

Trabajo Final de Máster

Master en Ingeniería de la Energía

Gestión de proyecto de optimización de la operación en sistemas de climatización

MEMORIA

Autor: Daniel Abia Serrano
Director: Roberto Villafáfila
Convocatoria: Junio-2018



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resumen

En este proyecto se describen las tareas desarrolladas en el proyecto GDO2Clim, financiado en el programa RETOS-COLABORACIÓN de 2014 y realizado por el consorcio formado por MCIA, CTM, ENERTIKA y WATTABIT. EL proyecto, plantea el desarrollo de herramientas basadas en algoritmos de inteligencia artificial para la mejora de la operación de los sistemas de climatización en edificios. Con tal de conseguir dicha optimización, se desarrollan una serie de modelos y algoritmos para el cálculo de previsiones de energía demandada, optimización de funcionamiento de cada una de las máquinas y determinación de la vida útil remanente de las mismas basado en la degradación del su rendimiento.

Se ha realizado un análisis del mercado y el estado del arte, en el que se detallan las iniciativas europeas y nacionales en relación a la mejora de la eficiencia energética en edificios. Se analiza la distribución de energía primaria y generación eléctrica estatal, así como las tendencias globales.

Se incluye un breve análisis sobre las principales tecnologías de climatización y los sistemas de monitorización, profundizando con mayor detalle en este campo a lo largo del proyecto. Asimismo, se particularizan las soluciones para las plantas piloto disponibles para la ejecución del proyecto.

Tras la caracterización de los sistemas y la implementación de los sistemas de adquisición de datos, se describe la metodología de desarrollo utilizada para la implementación de los modelos de optimización de clima. Con los modelos ya desarrollados y validados, se ha realizado el diseño funcional para su integración en la plataforma de gestión energética (EMS) W-Manager, desarrollada por la empresa WATTABIT. Finalmente, se incluye el estudio de validación de los resultados obtenidos por los modelos desarrollados.

Por último, se incluye el presupuesto del proyecto y el impacto sobre el entorno, así como las conclusiones.

Sumario

RESUMEN	1
SUMARIO	3
ÍNDICE DE FIGURAS	6
ÍNDICE DE TABLAS	7
1. INTRODUCCIÓN	8
1.1 Objetivos del proyecto	9
1.2 Alcance del proyecto.....	10
2. ANÁLISIS DE MERCADO Y ESTADO DEL ARTE	11
2.1 Distribución de la energía primaria y generación eléctrica en España.....	11
2.2 Iniciativas y estrategias para la eficiencia energética	15
2.3 Climatización y sistemas de monitorización - Estado del arte	17
3. SISTEMAS DE CLIMA Y PLANTAS PILOTO.....	21
3.1 Tecnologías de climatización analizadas.....	21
3.1.1 Calderas	21
3.1.2 Refrigeradores y bombas de calor	23
3.1.3 Solar térmica de tubos de vacío	25
3.1.4 Co-generación	26
3.2 Soluciones de monitorización	27
3.2.1 Calderas	27
3.2.2 Refrigeradores i bombas de calor [aire-agua]	28
3.2.3 Solar térmica.....	28
3.2.4 Cogeneración	29
3.3 Monitorización en la planta piloto.....	30
3.4 Plantas piloto	31
4. ANÁLISIS DE SISTEMAS DE CLIMATIZACIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS	38
4.1 Análisis de las variables y plan de datos de la maquinaria de clima.....	38
4.2 Sistemas de adquisición de datos.....	44
4.2.1 Monitorización de consumos eléctricos.....	44

4.2.2	Monitorización de consumos de gas.....	48
4.2.3	Monitorización de condiciones meteorológicas	49
4.2.4	Monitorización de datos de control y detalle de máquinas	49
4.3	Diagrama de los sistemas de adquisición de datos en edificio CTM	50
5.	MODELOS DE OPTIMIZACIÓN DE CURVA DE DEMANDA Y VIDA ÚTIL REMANENTE	51
5.1	Metodología de desarrollo	51
5.1.1	Análisis tecnológico y de la información disponible	52
5.1.2	Formulación del modelo por tecnología y de la metodología de ajuste	52
5.1.3	Presentación y análisis por los miembros del consorcio especialistas en energía	53
5.2	Módulo de supervisión energética de instalaciones de climatización para la optimización de la curva de demanda (OpCD)	53
5.3	Módulo de Análisis de Eficiencia Mantenimiento y Vida Remanente (ManVR).....	55
5.3.1	Fase de análisis de datos históricos	55
5.3.2	Desarrollo de algoritmo de vida útil remanente	57
5.3.3	Validación de resultados	57
6.	INTEGRACIÓN DE LOS ALGORITMOS EN W-MANAGER.....	58
6.1	Descripción de los sistemas de WATTABIT	58
6.2	Integración de modelos desarrollados	59
6.3	OpCD: Optimización de la Curva de Demanda	59
6.3.1	Configuración	59
6.3.2	Visualización	60
6.4	ManVR: Mantenimiento y predicción de vida remanente.....	63
6.4.1	Configuración	63
6.4.2	Visualización	64
7.	VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR LOS MODELOS	65
7.1	Módulo de supervisión y predicción.....	65
7.1.1	Módulo de optimización de clima y desagregación de cargas (OpCD).....	69
7.1.2	Módulo de vida remanente (ManVR)	70
8.	PRESUPUESTO	71
9.	IMPACTO SOBRE EL ENTORNO	72

10. CONCLUSIONES	74
11. AGRADECIMIENTOS.....	75
12. BIBLIOGRAFÍA	76
ANEXO A: DATOS MONITORIZADOS EN PLANTA PILOTO	77
ANEXO B: TRATAMIENTO Y ESTANDARIZACIÓN DE DATOS	85
<i>B.1 Rellenado de huecos</i>	<i>85</i>
<i>B.2 Eliminación del ruido.....</i>	<i>86</i>
<i>B.3 Eliminación de outliers.....</i>	<i>87</i>
<i>B.4 Estandarización del periodo de adquisición.....</i>	<i>89</i>
ANEXO C: RESULTADOS DE LA METODOLOGÍA DE DESARROLLO DE LOS MODELOS	90
<i>C.1 Análisis tecnológico y de la información disponible</i>	<i>90</i>
<i>C.1.1 Calderas de combustión</i>	<i>90</i>
<i>C.1.2 Refrigeradora y bombas de calor</i>	<i>91</i>
<i>C.1.3 Tecnología solar térmica</i>	<i>92</i>
<i>C.1.4 Cogeneración</i>	<i>92</i>
<i>C.2 Formulación de modelos</i>	<i>95</i>
<i>C.2.1 Calderas de combustión</i>	<i>95</i>
<i>C.2.2 Refrigeradora y bombas de calor</i>	<i>95</i>
<i>C.2.3 Tecnología solar térmica</i>	<i>96</i>
<i>C.2.4 Cogeneración</i>	<i>96</i>
<i>C.3 Presentación de los modelos.....</i>	<i>97</i>
<i>C.3.1 Calderas de combustión</i>	<i>97</i>
<i>C.3.2 Refrigeradora y bombas de calor</i>	<i>98</i>
<i>C.3.3 Tecnología solar térmica</i>	<i>100</i>
<i>C.3.4 Cogeneración</i>	<i>102</i>
ANEXO D: RESUMEN DEL ANÁLISIS DE MODELADOS.....	103

Índice de figuras

Figura 2.1: Distribución del consumo de energía primaria a nivel mundial [1]	12
Figura 2.2: Evolución del consumo de energía primaria a nivel mundial según los tres escenarios planteados en el WEO 2012. Fuente: IEA	13
Figura 2.3: Evolución de la demanda de energía eléctrica peninsular (TWh)	13
Figura 2.4: Generación eléctrica en España en 2017 (por fuente) [2]	14
Figura 2.5: Demanda energética en edificios en España Fuente: MINETAD/IDAE [4]	15
Figura 2.6: Grado de eficiencia en la combustión según tecnología [7]	17
Figura 2.7: Comparativa de eficiencia entre calderas estándar y de combustión [7]	18
Figura 3.1: Diagrama de funcionamiento de bombas de calor/refrigeradoras.....	24
Figura 3.2: Esquema de funcionamiento de refrigeradores y bombas de calor [13]	24
Figura 3.3: Equipo de generación de energía solar térmica [14]	25
Figura 3.4: Sistema de transferencia de calor en tubos de vacío [14]	25
Figura 3.5: Análisis de eficiencias entre generación convencional y co-generación [15].....	26
Figura 3.6: Ubicación del edificio CTM	31
Figura 3.7: Edificio piloto (Fundación CTM).....	31
Figura 3.8 Caldera de Gas Natural de condensación De Dietrich MCA 115.....	33
Figura 3.9: Enfriadora Daikin EWAD790CZXR.....	34
Figura 3.10: Captador Solar de Tubos de Vacío VITOSOL 200T.	34
Figura 3.11: Diagrama de instalación de los equipos en edificio CTM [12].....	35
Figura 3.12: Edificio Gaia, en Terrassa.....	36
Figura 4.1: Esquema de un sistema de climatización.....	39
Figura 4.2: Ejemplo lectura IP mediante IEC-870-5-102	45
Figura 4.3: Lectura mediante sonda óptica.....	46
Figura 4.4: Lectura mediante contador de medida indirecta	48
Figura 4.5: diagrama de los sistemas de medida y adquisición de datos	50
Figura 5.1: Esquema de bloques del módulo OpCD	54
Figura 5.2: COP Enfriadora 1 (Temporal)	56
Figura 5.3: COP Calderas 1-2-3 (Temporal).....	56
Figura 5.4: Modelo variables entrada/salida	57
Figura 6.1: Diagrama IoT WATTABIT	58
Figura 6.2: Panel de selección del criterio de optimización	60
Figura 6.3: Panel de selección de las temperaturas de confort.....	60
Figura 6.4: W-Manager, visualización multi-variable	61
Figura 6.5: Visualización módulo OpCD	61
Figura 6.6: Visualización estado de máquinas	62
Figura 6.7: Visualización módulo desagregación	62
Figura 6.8: Visualización módulo mantenimientos.....	63
Figura 6.9: Visualización módulo vida útil remanente.....	64
Figura 7.1: Predicción vs. Consumo real (con % error) [19]	66
Figura 7.2: Análisis semanal de consumo vs. predicción	68
Figura 7.3: Visualización de predicción en W-Manager.....	68
Figura 7.4: Temperatura interior promedio [19]	69
Figura 7.5: Desagregación de cargas de clima	70

Índice de tablas

Tabla 2.1: Datos de la distribución de generación eléctrica en España en 2017	14
Tabla 2.2: Previsión del impacto del sector de la eficiencia energética entre 2009 y 2020. Fuente: INE	16
Tabla 3.1: Ventajas y desventajas de calderas de condensación	22
Tabla 3.2: Ventajas y desventajas de calderas de baja temperatura	23
Tabla 3.3: Ventajas y desventajas de calderas de sistemas de co-generación.....	26
Tabla 3.4: Principales variables y equipos de medida en calderas	27
Tabla 3.5: Principales variables y equipos de medida en refrigeradores y bombas de calor	28
Tabla 3.6: Principales variables y equipos de medida en solar térmica	28
Tabla 3.7: Principales variables y equipos de medida en sistemas de co-generación	29
Tabla 3.8: Equipos disponibles en planta piloto	30
Tabla 3.9: Equipos instalados de generación de calor.....	33
Tabla 4.1: Tabla resumen del análisis tecnológico realizado a los equipos de producción de frío y calor seleccionados y las variables a monitorizar.	40
Tabla 4.2: Tabla resumen del análisis tecnológico realizado al sistema de distribución y las variables a monitorizar	41
Tabla 4.3: Tabla resumen del análisis tecnológico realizado en las unidades terminales y unidades de tratamiento de aire (UTA) y las variables a monitorizar	42
Tabla 4.4: Resumen del Plan de Adquisición de Datos	43
Tabla 7.1: Comparativa entre consumo real y predicción	67
Tabla 7.2: Datos de temperatura interior en planta piloto	69
Tabla 8.1: Costes del proyecto GDO2Clim por partida presupuestaria	71
Tabla 8.2: Costes del proyecto GDO2Clim por miembros del consorcio	71

1. Introducción

Este proyecto describe las principales tareas realizadas en el proyecto GDO2Clim, enmarcado en el programa Retos-Colaboración del año 2014, realizado por el consorcio de empresas formado por los centros de investigación MCIA y CTM, y las empresas ENERTIKA y WATTABIT.

El proyecto nace ante la creciente necesidad global de implementar sistemas que ayuden a la mejora de la eficiencia energética y contribuyan en un incremento en el ahorro energético. Desde el protocolo de Kioto, en el año 1997, se establecieron una serie de acuerdos internacionales en pro de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, con el fin de evitar el aumento del calentamiento global.

Los principales países industrializados firmaron el protocolo, de modo su aplicación fue tomando presencia durante los siguientes años. Es en 2005 cuando entra en vigor de forma oficial, y los países adscritos implementan medidas para cumplir con los objetivos de reducción propuestos (reducción del 5% de las emisiones de los gases de efecto invernadero en comparación al año 1990).

Tras la aplicación del protocolo de Kioto, se han llevado a cabo numerosas iniciativas y políticas energéticas tanto a nivel continental, nacional y regional. Un ejemplo de ello es la iniciativa europea *Horizon 2020*, la cual promueve y fomenta proyectos de innovación para conseguir los objetivos marcados por la Unión Europea de compromiso de reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero para el año 2020. Para ello, se establece un incremento del 20% del uso de fuentes de energía renovable, el incremento en un 20% de la eficiencia energética y la reducción del 20% de emisiones de gases de efecto invernadero.

Asimismo, a nivel nacional y autonómico también se dispone de iniciativas para incentivar el desarrollo de proyectos de I+D, como pueden ser los Retos-Colaboración o el Ris3cat. Estas iniciativas contribuyen de forma directa al desarrollo de tecnología propia que facilite la consecución de los objetivos a cumplir a nivel nacional marcados por la Unión Europea.

Existen varios sectores a los que se destina la inversión de los fondos de desarrollo de proyectos. Uno de los sectores en el uso de energía en edificios e industria, dos de los sectores más intensos a nivel de uso de energía eléctrica y de gas natural. Respecto a los edificios, la gran parte de la energía consumida se debe a los sistemas de climatización, con lo que una reducción de su uso y una mejora en la optimización de operación de dichos sistemas contribuye directamente a la mejora de la eficiencia energética en edificios. Consecuentemente, comporta una reducción en la emisión de gases de efecto invernadero.

Este proyecto, financiado por la iniciativa Retos-Colaboración 2014, incide directamente en la mejora de la operación de los sistemas de clima en edificios. Tanto en su uso eléctrico (refrigeradoras y bombas de calor) como en lo que respecta a uso de fuentes de energía fósiles como gas natural o gasoil (calderas).

La optimización del uso de los sistemas de clima promueve un uso eficiente de los mismos, contribuyendo al ahorro energético sin que ello suponga una reducción en las condiciones de confort de los usuarios.

1.1 Objetivos del proyecto

Este proyecto detalla las tareas realizadas dentro del proyecto GDO2Clim, con especial foco en las tareas de gestión del proyecto. Mi papel en el proyecto ha sido el de garantizar que las implementaciones y desarrollos se han ajustado a las necesidades y requerimientos marcados en el planteamiento.

La duración del proyecto ha sido de 3 años, iniciado a mediados de 2014 y finalizado en 2017. Los objetivos específicos de este proyecto son:

- Análisis de mercado y estado del arte
- Análisis de las tecnologías de clima en edificios
- Estudio de las soluciones de monitorización en sistemas de clima
- Diseño e implementación de los sistemas de monitorización en planta piloto
- Análisis de sistemas de climatización en planta piloto
- Adquisición de datos en planta piloto
- Metodología de desarrollo de algoritmos (OpCD y ManVR)
- Integración de algoritmos en plataforma W-Manager de WATTABIT
- Validación de los resultados obtenidos por los algoritmos
- Presupuesto e impacto en el entorno

1.2 Alcance del proyecto

Este TFM detalla las tareas de gestión realizadas dentro del proyecto “Optimización de la operación en sistemas de climatización” (GDO2Clim). El proyecto ha sido desarrollado por un consorcio de empresas formado por MCIA, CTM, ENERTIKA y WATTABIT y está enmarcado en la convocatoria RETOS-COLABORACIÓN 2014 - Energía, segura, eficiente y limpia – cuyo objetivo general consiste en la concepción y desarrollo de un conjunto de herramientas Software de Gestión Energética, capaces de mejorar la eficiencia energética de instalaciones de climatización mediante la gestión automática de los puntos de operación de los equipos y de consumos en el tiempo, para la reducción de los picos de potencia aplanando la curva de carga, mientras supervisa el rendimiento de la instalación y proporciona una estimación de su vida útil remanente.

Mi participación en el proyecto, como Product Manager de la empresa WATTABIT, es el de garantizar la correcta ejecución del mismo, realizar todas las tareas de gestión de los distintos grupos de trabajo, así como el de realizar los estudios de análisis de mercado para la justificación del proyecto y dar soporte a nivel funcional en las tareas llevadas a cabo por los grupos de trabajo.

Dicho proyecto se ha realizado en colaboración con el Centro Tecnológico de Manresa (CTM) de la UPC, un Centro Tecnológico Avanzado (CTA) altamente calificado, referente mundial en las tecnologías propias del centro, reconocido en los ámbitos científico e industrial. Este centro tecnológico ha sido el encargado de realizar el análisis y desarrollo de los algoritmos de inteligencia artificial.

El alcance de este TFM no incluye el desarrollo de los algoritmos de inteligencia artificial ni su consecuente explotación a nivel de producto dentro de la plataforma W-Manager. Las validaciones e integraciones de los desarrollos se han planteado a nivel funcional, con el fin de desarrollar en un futuro un producto orientado a la gestión optimizada de sistemas de clima en edificios.

2. Análisis de mercado y estado del arte

Durante la elaboración de la propuesta de proyecto se tuvo en cuenta el estado del arte y se realizó un análisis de mercado como justificación de la necesidad de implementar modelos de optimización en la gestión de los sistemas de climatización. En este capítulo se describe el estudio de mercado que se realizó.

Las principales fuentes consultadas para la realización del estudio de mercado son publicaciones de la Agencia Internacional de la Energía (IEA), el Instituto Nacional de Estadística (INE) y el instituto para la Diversificación y el Ahorro de la Energía (IDAE). Asimismo, también se ha asistido a seminarios y conferencias del Institut Català d'Energia (ICAEN).

Se han analizado las principales fuentes de energía primaria demandas de forma global. Posteriormente se analiza la situación energética en Europa y su evolución.

Dentro del estudio de mercado se analizan las iniciativas españolas, europeas y mundiales para el ahorro energético, entre las que destacan la estrategia europea "H2020" cuyo objetivo principal es la reducción de un 20% de las emisiones de CO₂, el incremento de la generación de electricidad mediante fuentes de energía renovable y el aumento en un 20% de las medidas de eficiencia energética.

También se han consultado fuentes de distintos fabricantes de sistemas de climatización para determinar qué sistemas son los que tienen una mayor penetración en el mercado y qué equipos son más atractivos a la hora de determinar el alcance del proyecto.

2.1 Distribución de la energía primaria y generación eléctrica en España

En el momento de realización del estudio de mercado del proyecto (año 2014), la distribución del consumo de energías primarias a nivel global tenía una distribución muy similar a los últimos datos obtenidos en el reciente estudio energético publicado por BP [1]. Se puede observar como ya en 2014 el porcentaje de uso de renovables había aumentado respecto a los datos de la década anterior.

Asimismo, se observa un crecimiento en estos últimos años en el consumo de gas natural en detrimento del carbón, lo cual refuerza las necesidades identificadas en el primer estudio realizado sobre la importancia de la optimización en la gestión del clima. Las calderas de combustión y condensación de fluido líquido utilizan principalmente gas natural, con lo que

una correcta optimización en el uso de estos equipos contribuye directamente en una reducción del uso de fuentes de energía fósiles.

En la siguiente Figura 2.1 extraída del informe anual de uso de energías de BP [1] se muestra la distribución global de consumo de energías primarias.

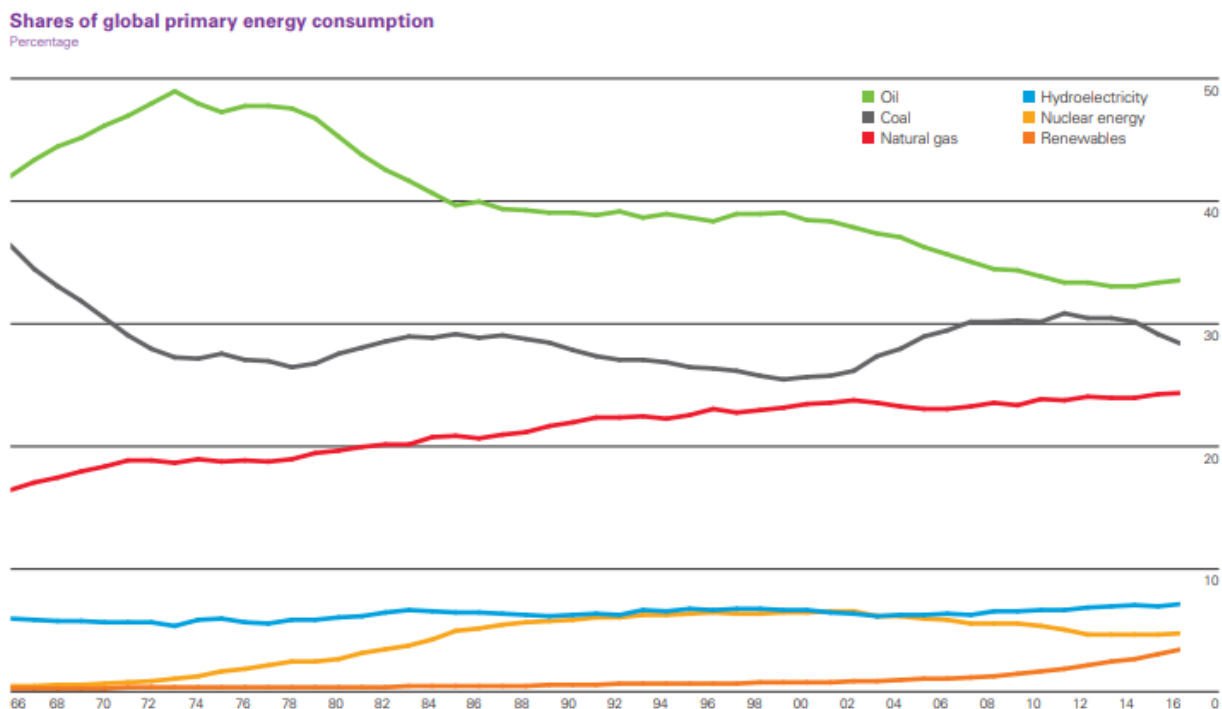


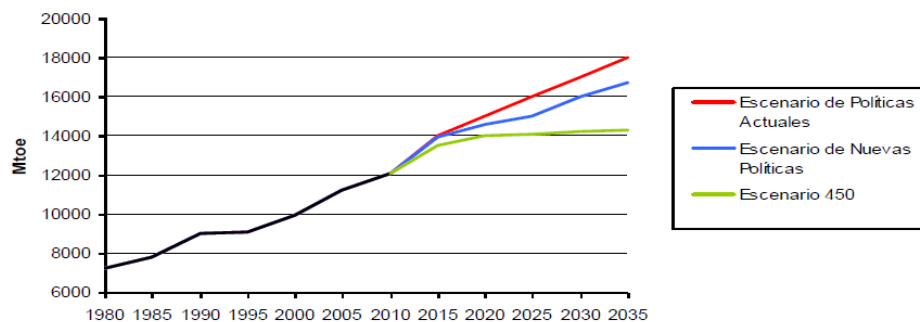
Figura 2.1: Distribución del consumo de energía primaria a nivel mundial [1]

En el anterior gráfico se puede observar como las fuentes fósiles corresponden a la gran mayoría de la demanda de energía primaria, esto se debe principalmente al uso de materiales fósiles en transporte, así como a la generación de electricidad mediante carbón en las regiones de Asia y Pacífico.

Según la IEA, existen tres escenarios de evolución del consumo de energía mundial, tal y como muestra la Figura 2.2. Los tres escenarios estiman las emisiones en función de las acciones que se llevarán a cabo en los próximos años para cumplir con los 3 casos siguientes:

- Escenario sin cambios respecto el consumo actual
- Escenario en el que se adoptan las estrategias y medidas de reducción actuales
- Escenario de máxima restricción en consumo, limitando a 450ppm de concentración de CO₂ en atmósfera.

De acuerdo a estos modelos, la evolución del consumo energético según fuente primaria sigue la evolución que muestra la siguiente figura:



Fuente: IEA (International Energy Agency)

Figura 2.2: Evolución del consumo de energía primaria a nivel mundial según los tres escenarios planteados en el WEO 2012. Fuente: IEA

Centrándonos en la generación eléctrica en el mercado español, desde 2014 se ha observado un aumento en la demanda de energía eléctrica. La recuperación de la economía contribuye a este aumento. Asimismo, según los datos publicados en REE [2], en 2017, año de finalización del proyecto GDO2Clim, se alcanzó una demanda de 253 TWh (Figura 2.3).

Evolución de la demanda de energía eléctrica peninsular (TWh)

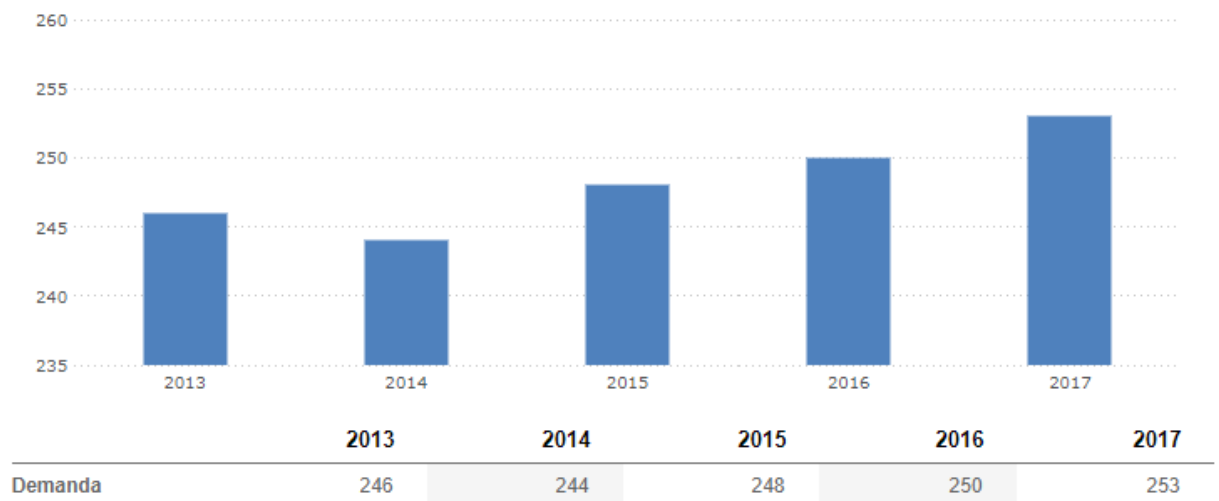


Figura 2.3: Evolución de la demanda de energía eléctrica peninsular (TWh)

Se puede observar como el aumento de la energía demandada a nivel de generación eléctrica sigue una tendencia similar a las predicciones de la segunda previsión de demanda de la IEA.

A nivel de generación, la distribución de generación eléctrica en España del año 2017 [3], por fuente, es la siguiente:

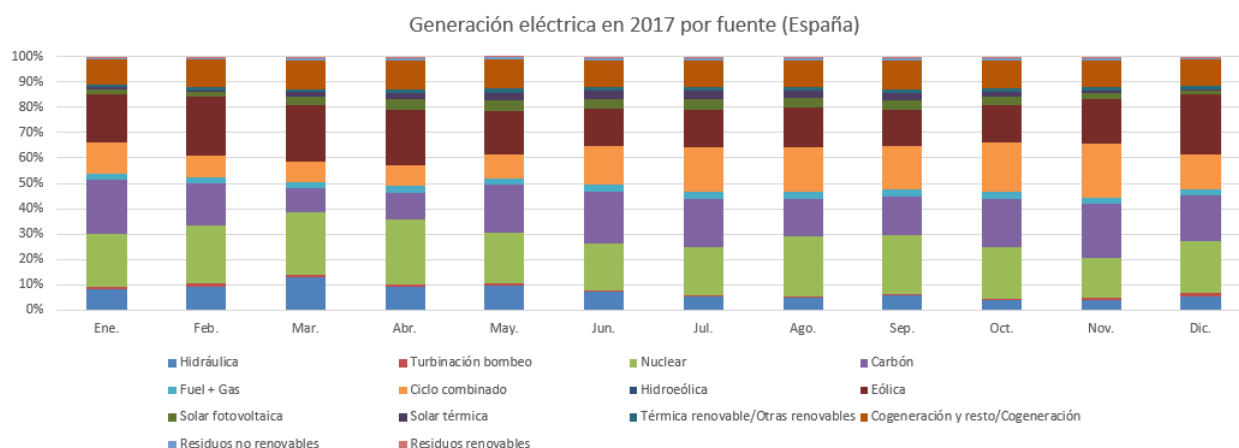


Figura 2.4: Generación eléctrica en España en 2017 (por fuente) [2]

El promedio de 2017 en cuanto a distribución de la generación eléctrica en España es el siguiente [3]:

Tabla 2.1: Datos de la distribución de generación eléctrica en España en 2017

Fuente	2017
Hidráulica	7,00%
Turbinación bombeo	0,90%
Nuclear	21,20%
Carbón	17,20%
Fuel + Gas	2,70%
Ciclo combinado	14,20%
Hidroeólica	0,00%
Eólica	18,20%
Solar fotovoltaica	3,20%
Solar térmica	2,00%
Térmica renovable/Otras renovables	1,40%
Cogeneración y resto/Cogeneración	10,70%
Residuos no renovables	1,00%
Residuos renovables	0,30%

Tal y como se puede observar en la Tabla 2.1, las fuentes fósiles representan alrededor del 40% de la generación de energía eléctrica. De modo que los proyectos de mejora en la eficiencia energética como el presente, representan una mejora directa en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Analizando más en detalle la demanda sectorial en edificios, podemos observar como la demanda energética de los edificios en sector servicios y residencial corresponde

aproximadamente el 30% de la demanda global de los edificios. Estas cifras confirman la necesidad de implementar proyectos de eficiencia energética en edificios.

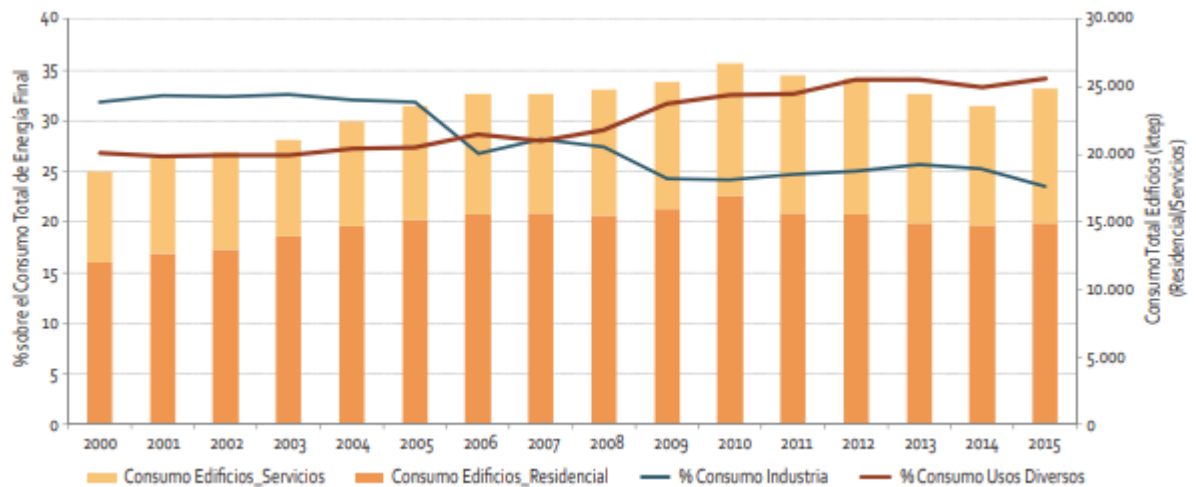


Figura 2.5: Demanda energética en edificios en España Fuente: MINETAD/IDAE [4]

2.2 Iniciativas y estrategias para la eficiencia energética

Tanto global como regionalmente se dispone de diversas iniciativas y estrategias para la mejora de la eficiencia energética y la reducción de gases de efecto invernadero. La estrategia Europea “Horizonte 2020”, en la que se incentivan proyectos en los que se investigue sobre mejorar en la eficiencia energética, promover el uso de renovables y reducir la emisiones se establecen los siguientes objetivos recogidos en la *Directiva 2009/28/CE*:

- Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en un 20% (30% si se alcanza un acuerdo internacional).
- Reducción del consumo de energía en un 20% a través de medidas de eficiencia energética. Además, a nivel de transporte, los países que forman parte del acuerdo deben conseguir que el 10% de las fuentes de energía usadas en transporte se cubran con biocombustibles.
- Promoción de la generación de electricidad y otras fuentes a través de fuentes de energía renovables hasta llegar a un 20% del total de generación.

Asimismo, la *Directiva 2006/32/CE* establece que los estados miembros de la Unión Europea deben presentar planes de promoción de medidas de eficiencia energética. Dicha directiva fue actualizada en 2012, a través de la directiva 2012/27/UE del Parlamento Europeo. En esta directiva se establece que los estados miembros deben actualizar sus

planes de acción de forma recurrente, cada 3 años. De acuerdo con el artículo 4 de la Directiva 2012/27/UE, España debe actualizar y remitir, en el marco de los Planes nacionales de acción para la eficiencia energética, la estrategia a largo plazo para movilizar inversiones en la renovación del parque nacional de edificios residenciales y comerciales, tanto público como privado. Las actualizaciones de dichos planes son gestionados por el Ministerio de Fomento de España.

Durante la elaboración del estudio de mercado para la justificación del proyecto, cabe destacar el *plan de activación de la eficiencia energética en los edificios de Administración General del Estado (PAEE-AGE)*, de 2011, que tuvo por objetivo conseguir que 330 centros consumidores de energía pertenecientes a la Agencia General del Estado, redujeran su consumo de energía en un 20% para el año 2016 mediante la ejecución de medidas de ahorro y eficiencia energética llevadas a cabo por empresas privadas [5].

Otro de los planes destacables durante la presentación del proyecto fue el *plan de ahorro, eficiencia energética y reducción de emisiones en el transporte y la vivienda* [6], cuyo objetivo es el de reducir las emisiones en transporte y vivienda entre los años 2010 y 2020.

De acuerdo a los estudios publicados en 2010 sobre la evolución del impacto de las medidas de eficiencia energética en edificios públicos y privados, así como en transporte, la generación de empleos e ingresos supondría una gran ventaja en el sector.

Tabla 2.2: Previsión del impacto del sector de la eficiencia energética entre 2009 y 2020. Fuente: INE

	2009		2016		2020	
	Mill. euros / N° de empleos	% sobre España	Mill. euros / N° de empleos	% sobre España	Mill. euros / N° de empleos	% sobre España
Producción (mill. de €)						
Magnitud del sector	21.462	1,0%	40.472	1,7%	58.154	2,3%
Impacto productivo	50.247	2,5%	94.756	4,0%	136.153	5,3%
VAB (mill. de €)						
Magnitud del sector	7.431	0,8%	14.013	1,3%	20.136	1,6%
Impacto productivo	17.771	1,8%	33.513	3,0%	48.155	3,9%
Empleo (número empleos)						
Magnitud del sector	106.393	0,5%	200.634	0,9%	288.290	1,1%
Impacto productivo	281.473	1,4%	530.798	2,3%	762.698	3,0%

Teniendo en cuenta las previsiones de inversión, generación de empleos y directivas europeas y nacionales, las garantías de emprender un proyecto de eficiencia energética como el que se planteó en 2013 eran muy elevadas. Es por ello que se decidió presentarlo en un RETOS-COLABORACIÓN-2014, perteneciente al *Programa Estatal de I+D+i Orientada a los Retos de la Sociedad* con financiación a través de FEDER · Fondo Europeo de Desarrollo Regional.

2.3 Climatización y sistemas de monitorización - Estado del arte

De acuerdo al estudio realizado por FENERCOM (Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid) en 2011, en el que se realizaron las previsiones de demanda en climatización de edificios según las directrices europeas vigentes, desde 2007 es necesario introducir nuevas tecnologías para la generación de frío/calor en edificios si se desea cumplir las distintas normativas de mejora en la eficiencia energética.

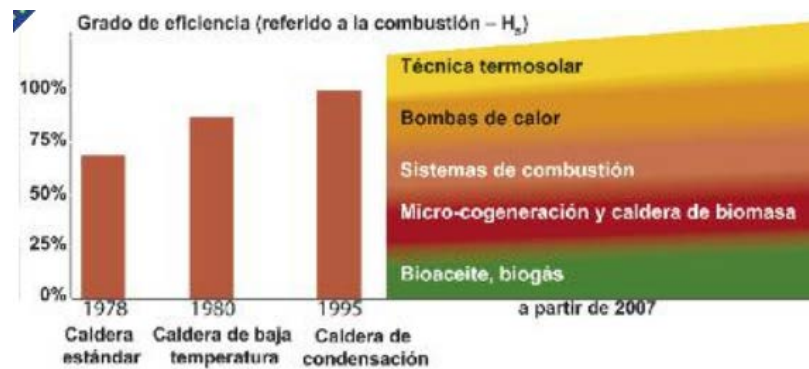


Figura 2.6: Grado de eficiencia en la combustión según tecnología [7]

En el gráfico anterior se puede observar como desde la introducción de la caldera estándar en edificios, cuyo rendimiento ronda el 70%, se han introducido nuevas tecnologías de combustión, como las calderas de baja temperatura y las de condensación, llegando a grados de eficiencia en combustión cercanos al 100%. Desde 2007 se hace necesario introducir nuevas tecnologías para mejorar la eficiencia así como reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.

En cualquier caso, si analizamos la generación de calor mediante combustión de gas natural, sistema más comúnmente utilizado en los edificios objeto de este proyecto, observamos como la principal mejora en el ahorro energético proviene de la utilización de calderas de condensación. Obteniendo un ahorro de hasta el 40% respecto a las calderas de combustión estándares.

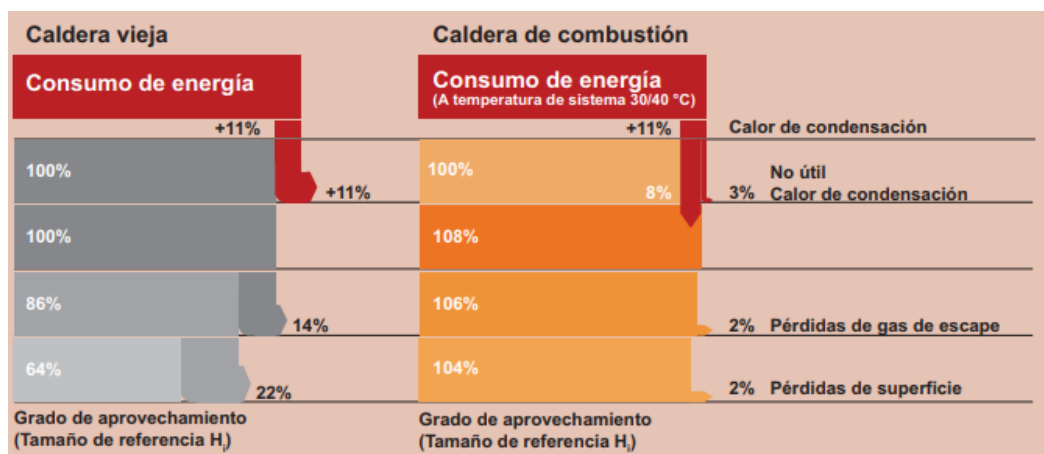


Figura 2.7: Comparativa de eficiencia entre calderas estándar y de combustión [7]

Respecto a los sistemas de refrigeración, principalmente se alimentan de energía eléctrica. Para disponer de una correcta eficiencia energética en el circuito de generación y distribución de frío, es importante tener en cuenta los siguientes aspectos [8].

- Aumento de la temperatura de evaporación (ahorros de entre un 1% y 4%)
 - Evitar hielo en evaporadores
 - Liberar de obstrucciones los conductos de aire
 - Mantener limpios los filtros de refrigerante
 - Elevación de la temperatura de vaporación del regulador
- Control de la temperatura de condensación
 - Disminuciones de la temperatura de condensación pueden aportar entre un 2% y 3% de ahorro.
 - Control en la presión de condensación

Respecto a los sistemas de monitorización, se dispone de diversas alternativas para la monitorización y visualización de datos. Se destacan las siguientes tecnologías [9]:

- SCADA (Supervisory Control and Data Acquisition)
 - Sistema pensado principalmente para la operación de procesos industriales, tales como la generación de energía, procesos productivos, tratamiento de aguas, elaboración o tratamiento de productos químicos, etc.

La principal característica es que trabajan en tiempo real y generalmente las funcionalidades de visualización de series históricas de datos son limitadas.

- BMS (Building Management System)
 - Equivalente al SCADA en la gestión de edificios. Instalaciones como la iluminación, los sistemas de climatización (enfriadoras, climatizadoras, calderas...), sistemas contra incendios, CCTV son habitualmente controlados por estos sistemas. Al igual que el SCADA trabajan en tiempo real y permiten realizar actuaciones sobre las infraestructuras energéticas.
- SGE/EMS (Sistema de Gestión Energética – Energy Management System)
 - Tanto en ambientes industriales como en edificios se utilizan para la monitorización, análisis y seguimiento de las instalaciones energéticas utilizando datos de consumo energético y diferentes variables que afectan al mismo. Estos sistemas no están pensados para la operación de instalaciones, aunque se vuelven imprescindibles para agregar la información y facilitar la toma de decisiones.

Dado que en el proyecto no se hace imprescindible realizar acciones en la maquinaria en tiempo real, y los procesos no son críticos como para disponer de datos de forma instantánea, se descarta utilizar un sistema tipo SCADA. Asimismo, puesto que los datos van a ser recopilados de forma local y enviados al cloud, se opta por utilizar un EMS – Energy Management System. Basado en la plataforma W-Manager desarrollada por WATTABIT.

En la actualidad existen numerosas aplicaciones de gestión energética. Su principal función es la de agregar los datos de consumo, así como datos externos como pueden ser temperaturas, ocupaciones de personal, unidades de producción (en industria), horarios de funcionamiento de una máquina/edificio, etc. Gracias a esta agregación de datos, las herramientas permiten realizar un análisis exhaustivo y una comparativa entre los comportamientos de distintas máquinas o edificios. Gracias a la normalización de valores absolutos mediante KPIs (Key Performance Indicators), el usuario puede comparar fácilmente la eficiencia de las máquinas monitorizadas, ya sea realizando comparaciones temporales o entre dispositivos.

Otra ventaja de los sistemas de gestión energética (EMS) es que facilitan el cumplimiento del Real Decreto 56/2016, relativo a la eficiencia energética, en lo referente a auditorías energéticas, acreditación de proveedores de servicios y auditores energéticos y promoción

de la eficiencia en el suministro de energía [10]. Gracias a la monitorización de consumos y la aplicación de medidas de eficiencia energética cuantificables desde una plataforma auditada, los gestores energéticos de los edificios pueden beneficiarse de una reducción de costes en las auditorías.

Según un estudio publicado en el portal de Eficiencia y Servicios Energéticos ESEficiencia [11], un 15% de las empresas participantes en la encuesta sobre eficiencia energética en edificios declara haber podido cumplir con el RD 56/2016 mediante la implantación de un Sistema de Gestión Energético acorde a la Norma ISO 50.001:2011. Asimismo, se concluye que cara a 2020, los Sistemas de Gestión Energética mediante la implantación de la Norma ISO 50.001:2011 son la opción señalada por muchas empresas para cumplir con el Real Decreto 56/2016.

3. Sistemas de clima y plantas piloto

La información incluida en este capítulo tiene referencias en el paquete de trabajo 2 del proyecto, concretamente, en el documento *E2.1 - Marco de actuación del proyecto, especificaciones técnicas* [12].

3.1 Tecnologías de climatización analizadas

Se ha realizado un estudio sobre las principales tecnologías presentes en el sector energético terciario. Par la elección de dichas tecnologías se ha contado con el apoyo de Enertika, especialista en sistemas de eficiencia energética. Es importante destacar que para este proyecto se enfatiza el hecho de utilizar tecnologías que tengan una gran demanda en el sector terciario, con el fin de poder replicar los resultados del proyecto en el máximo número de instalaciones que Enertika está gestionando actualmente.

En una primera aproximación del proyecto, se analizaron las siguientes tecnologías:

- Calderas
 - Combustible de fluido
 - Condensación (Gas Natural)
 - Calderas de baja temperatura
 - Combustible sólido
- Refrigeradoras y bombas de calor
- Solar térmica (tubos de vacío)
- Co-generación

En los siguientes apartados se ofrece una breve descripción de cada una de las tecnologías objeto del proyecto.

3.1.1 Calderas

La caldera es una máquina que genera calor gracias a la combustión de combustible en su interior, transfiriendo la energía térmica en un intercambiador de calor a un caloportador. Dicho caloportador fluirá por la instalación aportando el calor a los elementos terminales.

Existen diversos tipos de calderas, aunque los principios de funcionamiento son muy similares entre ellos. En primer lugar, se debe generar energía térmica a través del combustible y ésta es transferida al caloportador.

Se distinguen dos familias según el tipo de combustible, fluido o sólido. Las calderas de combustible líquido son las que realizan el quemado de combustible derivados del petróleo fundamentalmente (gasóleo y gas natural). Las de combustible sólido, queman minerales o biomasa (astillas, pellets...)

A continuación se describen los diferentes tipos de caldera que se han considerado en el proyecto.

3.1.1.1 Caldera de condensación

Forma parte de las calderas de combustible líquido. La principal característica diferencial de este tipo de calderas es su alto rendimiento gracias a la condensación de líquidos y calor latente.

Si bien una caldera de condensación puede llegar a temperaturas máximas en el caloportador más bajas que las calderas tradicionales, el rendimiento es mucho superior. Su principio de funcionamiento se basa en el aprovechamiento de calor de vaporización del agua formada en la caldera. Por ello, es importante que el combustible quemado no contenga azufre, de este modo se evita la formación de ácidos. El combustible más comúnmente usado en este tipo de calderas es gas natural.

A continuación se detallan las principales ventajas y desventajas de este tipo de calderas:

Tabla 3.1: Ventajas y desventajas de calderas de condensación

Ventajas	Desventajas
Alto rendimiento (recuperación de un 10% de calor)	Se necesita mayor superficie de radiación
Ahorro en combustible	Temperaturas de trabajo del caloportador más bajas
Bajas emisiones de NOx	Coste más elevado que las calderas convencionales
Compatibles con sistemas de radiación convencionales	Necesario sistema evacuación de condensados
	Material de fabricación más robustos (más caros)

3.1.1.2 Caldera de baja temperatura

Forma parte de las calderas de combustible líquido. Las calderas de baja temperatura trabajan a temperaturas inferiores a las de condensación (sobre los 40° en las de baja temperatura, respecto los 50°C de las de condensación).

Las calderas de baja temperatura no producen condensaciones, de modo que su rendimiento es ligeramente inferior a las de condensación.

Tabla 3.2: Ventajas y desventajas de calderas de baja temperatura

Ventajas	Desventajas
Altos rendimientos (sobre el 95%)	Desaprovechamiento de cierta energía en los gases en combustión
Ahorro en combustible (hasta 25% respecto las calderas estándar)	Coste más elevado que las calderas convencionales
Regulación de temperatura en función de la demanda	
No condensan, lo que produce menor corrosión	

3.1.1.3 Caldera de combustible sólido

Las calderas de combustible sólido se caracterizan por la combustión de materiales sólidos, principalmente biomasa. En este tipo de calderas se dispone de un hogar con 2 compartimentos, en el superior se ubica el brasero, donde se realiza la quema del combustible. En el compartimento inferior se recogen las cenizas derivadas de la combustión.

Dispone de una entrada de aire para realizar la combustión. Gracias a la diferencia de presiones, el aire accede al hogar y los humos de la combustión son expulsados por la chimenea.

En este tipo de calderas no se puede regular el encendido y apagado de la combustión, ya que su combustión es continua. Sí que se puede determinar la cantidad de aire que puede acceder desde el tiro. De este modo, se regula la cantidad de combustión y, consecuentemente, la tempera de transferencia de calor en el intercambiador.

3.1.2 Refrigeradores y bombas de calor

Este tipo de máquinas funcionan generalmente con energía eléctrica. Las máquinas refrigeradoras utilizan los principios de la termodinámica para mantener un espacio a baja temperatura, extrayendo el calor de un foco a baja temperatura para transmitirlo a otro con temperaturas altas.

Mediante el uso de 4 elementos en el circuito, se posibilita la extracción de calor o frío en el circuito para generar frío (refrigeradores) o calor (bombas de calor) según convenga.

A continuación se puede observar un breve diagrama de funcionamiento del principio termodinámico utilizado en este tipo de máquinas.



Figura 3.1: Diagrama de funcionamiento de bombas de calor/refrigeradoras

De forma más esquemática, a continuación se incluye (Figura 3.2) una representación del principio de funcionamiento. Cabe destacar que pese a que refrigeradores y bombas de calor siguen el mismo principio, los diseños mecánicos son ligeramente diferentes.

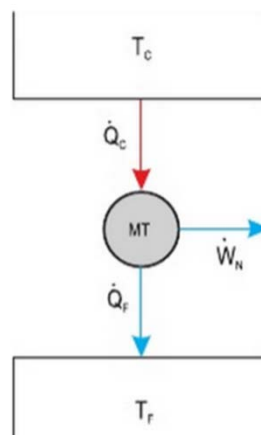


Figura 3.2: Esquema de funcionamiento de refrigeradores y bombas de calor [13]

Existen distintos tipos de intercambiadores de calor en las refrigeradoras. El más utilizado es el intercambio aire-agua. Esto se consigue mediante el uso de radiadores, que hacen circular el aire, disipando el calor contenido en los tubos que contienen el agua. De este modo, se consigue que la temperatura en el agua tras la descompresión sea inferior.

Debido a la condensación sufrida durante el proceso, este tipo de máquinas necesitan evacuar los líquidos de condensación.

3.1.3 Solar térmica de tubos de vacío

Los sistemas de generación de calor mediante energía solar térmica de tubos de vacío representan uno de los sistemas más eficiente en lo que a utilización de energía solar se refiere. Estos equipos disponen de colectores de calor en los que inciden los rayos solares generando energía térmica usada en la transferencia de calor con el caloportador.



Figura 3.3: Equipo de generación de energía solar térmica [14]

La transferencia de calor entre la energía térmica captada y el caloportador se realiza mediante el flujo del caloportador por el mástil. Los tubos de vacío captan el calor, que transfiere el calor al caloportador. A continuación se muestra un esquema del funcionamiento de la captación de calor.

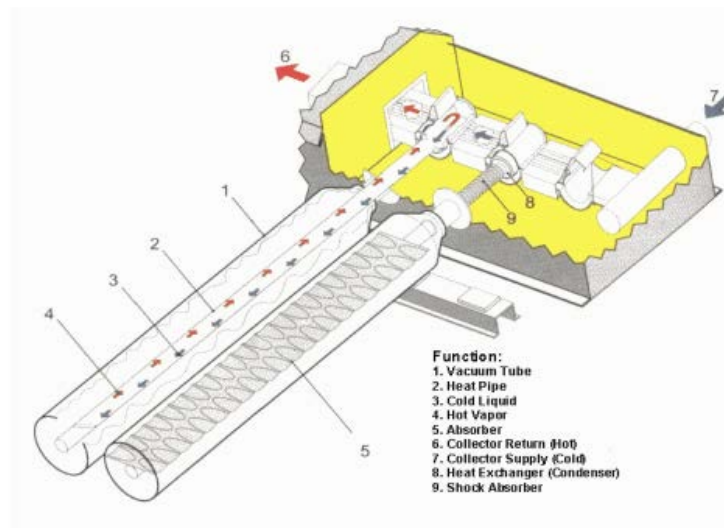


Figura 3.4: Sistema de transferencia de calor en tubos de vacío [14]

Estos sistemas disponen de depósitos aislados para el almacenamiento de agua caliente. De este modo, se puede hacer uso del agua caliente en horas en las que no haya aportación de energía solar térmica.

3.1.4 Co-generación

Los sistemas de co-generación basan su funcionamiento en el aprovechamiento de la energía térmica excedente de un proceso para la generación de energía eléctrica. De este modo, son capaces de producir tanto energía eléctrica como energía térmica (en forma de vapor o agua caliente sanitaria (ACS)).

La eficiencia de este tipo de plantas es muy superior a las tecnologías convencionales gracias al aprovechamiento del calor excedente tras la generación de energía eléctrica para poder generar energía térmica. El incremento de eficiencia en co-generación respecto a la generación convencional es de hasta un 24%.

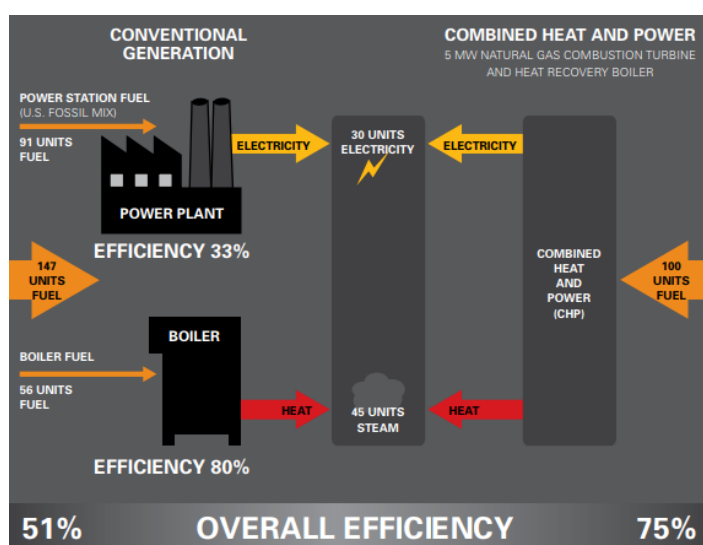


Figura 3.5: Análisis de eficiencias entre generación convencional y co-generación [15]

La energía eléctrica se genera usando turbinas conectadas a generadores eléctricos. Estos sistemas pueden funcionar con distintos tipos de combustibles fósiles (gasóleo, gas natural) o biocombustibles.

Tabla 3.3: Ventajas y desventajas de calderas de sistemas de co-generación

Ventajas	Desventajas
Rendimiento energético elevado	Costes de operación y mantenimiento propios
Facilita la descentralización eléctrica	Inversión inicial elevada
Orientado principalmente a entornos industriales para reaprovechamiento de fuentes de calor disipadas	
Reducción en emisiones	

3.2 Soluciones de monitorización

El proyecto basa su ejecución en la monitorización de los distintos sistemas de generación térmica, refrigeración y generación eléctrica. Es por ello que uno de los puntos más importantes es identificar qué variables deben considerarse para el análisis de información y qué sistemas de adquisición de datos se van a diseñar.

En este apartado se recoge el análisis de las variables y equipos necesarios para la toma de datos de los equipos objeto del estudio.

La información contenida en este apartado ha sido extraída del apartado 4.2 del documento *E2.1 - Marco de actuación del proyecto, especificaciones técnicas*. [12]

3.2.1 Calderas

Respecto a las calderas, a continuación se muestran las principales variables y equipos de medida a considerar en la monitorización:

Tabla 3.4: Principales variables y equipos de medida en calderas

Tecnología	Variable	Equipo
Condensación GN/Propano Baja temperatura GN/Propano	Temperatura de impulsión (salida del circuito de agua)	Sondas térmicas intrusivas Sondas térmicas de contacto
	Temperatura de retorno (entrada del circuito de agua)	
	Caudal de agua	Caudalímetro instalado en tubería, no intrusivo, mediante lectura de ultrasonidos
	Consumo de combustible	Contaje de impulsos emitidos por el contador de gas a través de lector tipo reed
	Temperatura ambiente	Sonda de temperatura o lecturas a través de servicio meteorológico on-line
Combustible sólido biomasa (astilla o pellet)	Temperatura de impulsión (salida del circuito de agua)	Sondas térmicas intrusivas Sondas térmicas de contacto
	Temperatura de retorno (entrada del circuito de agua)	
	Caudal de agua	Caudalímetro instalado en tubería, no intrusivo, mediante lectura de ultrasonidos
	Consumo de combustible	Medida indirecta del consumo mediante la lectura del consumo del motor del último tornillo sin fin que alimenta la caldera y las características del bis.
	Temperatura ambiente	Sonda de temperatura o lecturas a través de servicio meteorológico on-line

3.2.2 Refrigeradores i bombas de calor [aire-agua]

A continuación se describen las principales variables y equipos de medida en refrigeradores y bombas de calor.

Tabla 3.5: Principales variables y equipos de medida en refrigeradores y bombas de calor

Tecnología	Variable	Equipo
Refrigeradores i bombas de calor [solo aire-agua (aerotermia)]	Temperatura de impulsión (salida del circuito de agua)	Sondas térmicas intrusivas
	Temperatura de retorno (salida del circuito de agua)	Sondas térmicas de contacto
	Caudal de agua	Caudalímetro instalado en tubería, no intrusivo, mediante lectura de ultrasonidos
	Consumo eléctrico	Contador de energía o analizador de red (lectura directa o indirecta mediante transformadores de medida)
	Temperatura aire exterior	Sonda de temperatura o lecturas a través de servicio meteorológico on-line

3.2.3 Solar térmica

Tabla 3.6: Principales variables y equipos de medida en solar térmica

Tecnología	Variable	Equipo
Captadores solares térmicos, convencionales y por tubos de vacío	Temperatura de impulsión (salida del circuito de agua)	Sondas térmicas intrusivas
	Temperatura de retorno (salida del circuito de agua)	Sondas térmicas de contacto
	Caudal de agua	Caudalímetro instalado en tubería, no intrusivo, mediante lectura de ultrasonidos
	Radiación incidente en superficie horizontal	Lecturas a través de servicio meteorológico on-line
	Temperatura aire exterior	Sonda de temperatura o lecturas a través de servicio meteorológico on-line
	Humedad aire exterior	

3.2.4 Cogeneración

Tabla 3.7: Principales variables y equipos de medida en sistemas de co-generación

Tecnología	Variable	Equipo
Cogeneración de GN con MACI	Temperatura de impulsión (salida del circuito de agua)	Sondas térmicas intrusivas
	Temperatura de retorno (salida del circuito de agua)	Sondas térmicas de contacto
	Caudal de agua	Caudalímetro instalado en tubería, no intrusivo, mediante lectura de ultrasonidos
	Producción eléctrica	Contador de energía o analizador de red (lectura directa o indirecta mediante transformadores de medida)
	Consumo de combustible	Contaje de impulsos emitidos por el contador de gas a través de lector tipo reed
	Temperatura ambiente	Sonda de temperatura o lecturas a través de servicio meteorológico on-line

3.3 Monitorización en la planta piloto

El proyecto se ejecuta en el edificio del Centre Tecnològic de Manresa (Edificio CTM) en el cual se dispone de los equipos de refrigeración, generación de calor y generación de energía solar térmica. No se dispone de equipos de co-generación, con lo que se deja fuera del alcance la monitorización de esos sistemas.

A continuación se muestran los equipos disponibles, así como los sistemas de monitorización instalados en la planta piloto para la adquisición de datos y posterior implementación de los algoritmos inteligentes de optimización en la gestión del clima.

Tabla 3.8: Equipos disponibles en planta piloto

Sistema de climatización		
Equipo del sistema	Monitorización	
Refrigeradora	Producción	Sondas de temperatura del sistema Schneider
		Medidas de caudal puntual mediante caudalímetro portátil. Correlaciones entre caudal y estado de las bombas.
	Consumo	Analizador de redes fijos
Calderas	Producción	Sondas de temperatura del sistema Schneider
		Medidas de caudal puntual mediante caudalímetro portátil. Correlaciones entre caudal y estado de las bombas.
	Consumo	Lectura óptica del contador de gas
Captadores solares térmicos de tubos de vacío	Producción	Sondas de temperatura del sistema Schneider
		Medidas de caudal puntual mediante caudalímetro portátil. Correlaciones entre caudal y estado de las bombas.
	Consumo/Recurso	Estación meteorológica con piranómetro
Otros elementos del sistema de monitorización		
Condiciones climatológicas	Radiación solar Temperatura Humedad Velocidad del viento Dirección del viento Precipitaciones	Estación meteorológica

3.4 Plantas piloto

En esta sección se presenta la información detallada de la planta piloto que se ha utilizado en el proyecto. La información contenida en esta sección se puede consultar en el apartado 5 del documento *E2.1 - Marco de actuación del proyecto, especificaciones técnicas* [12].

El edificio piloto está ubicado en Manresa, siendo la sede de la Fundació CTM Centre Tecnològic. Cabe destacar que CTM es uno de los 4 miembros del consorcio formado en este proyecto. La dirección del edificio es Plaça de la Ciència 2, Manresa (08243).



Figura 3.6: Ubicación del edificio CTM



Figura 3.7: Edificio piloto (Fundación CTM)

El edificio se construyó en el año 2013 y tiene una superficie construida de 11.761 m². Con el fin de poder evaluar de forma más precisa los modelos de funcionamiento del clima, es necesario conocer las horas de actividad, tanto en invierno como en verano así como el número promedio de usuarios.

Número de promedio de usuarios: 70 personas

Horarios de actividad:

- Invierno
 - De lunes a jueves de 7:00h a 19:00h
 - Viernes de 7:00h a 16:00h
 - Sábados y domingos, cerrado
- Verano (julio y agosto)
 - De lunes a viernes de 7:00h a 16:00h
 - Sábados y domingos, cerrado

Otro aspecto relevante para la caracterización de los modelos es conocer las características y detalles de las instalaciones energéticas del edificio.

Cabe destacar que puesto que el edificio es de construcción reciente, dispone de elementos de climatización eficientes, así como elementos pasivos para la mejora de la eficiencia de la ventilación.

La ventilación del edificio se realiza mediante un circuito de circulación de aire, conectado a un pozo provenzal (o canadiense), que refrigera (o calienta) el aire del exterior gracias a la inercia térmica del subsuelo.

El sistema de ventilación cuenta con dos climatizadoras (o UTA) *Servoclima*. Este elemento es el encargado de garantizar un correcto filtrado y recirculación del aire, así como de mantener los niveles de temperatura y humedad relativa de confort.

La instalación de los circuitos de calefacción/refrigeración está basada en 4 tubos de agua que ejercen la función de caloportadores. Estos 4 tubos permiten disponer de transporte de calor y frío de forma simultánea, proporcionando un mayor confort en la instalación. Existen 2 tubos para el circuito de agua caliente (impulsión y retorno) y 2 tubos para el circuito de agua fría (impulsión y retorno). A lo largo del edificio se dispone de fan-coils (en las diferentes salas, oficinas, laboratorios y demás estancias del edificio) para permitir la termotransferencia de calor/frío a las diferentes partes del edificio.

Respecto a la producción de calor y ACS, el edificio dispone de 3 calderas de condensación de la marca *De Dietrich*. Éstas están conectadas a los 2 tubos de circuito de agua caliente, al circuito de climatizadoras y al de agua caliente sanitaria.

La generación de frío se realiza mediante 1 equipo de refrigeración, conectado a l circuito de agua fría (2 tubos, impulsión y retorno) y al circuito de climatizadoras. Esta enfriadora es de la marca Daikin.

La siguiente tabla muestra los detalles técnicos de los equipos de generación de calor (calderas) instalados en el edificio.

Tabla 3.9: Equipos instalados de generación de calor

	Caldera 1	Caldera 2	Caldera 3
Tipo de caldera	Caldera de condensación	Caldera de condensación	Caldera de condensación
Combustible:	Gas Natural	Gas Natural	Gas Natural
Potencia térmica nominal:	115kW	90 kW	90 kW
Rendimiento:	109 % Máximo	109 % Máximo	109 % Máximo
Modelo comercial:	MCA-115	MCA - 90	MCA - 90
Servicios energéticos abastecidos:	Circuito primario de calor	Circuito primario de calor	Circuito primario de calor



Figura 3.8 Caldera de Gas Natural de condensación De Dietrich MCA 115.

Detalle del equipo de enfriadora eléctrica:

- **Potencia Frigorífica:** 789 kW
- **Potencia Eléctrica:** 271 kW
- **Modulación:** 20 % - 100%
- **COP:** EER 2,91 / ESEER 5,76
- **Modelo comercial:** Daikin EWAD790CZXR –Stepless



Figura 3.9: Enfriadora Daikin EWAD790CZXR.

Detalle de la instalación solar térmica:

- **Tecnología:** Colector de tubos de vacío
- **Orientación del campo:** Sur
- **Inclinación de los captadores:** 35°
- **Superficie total de captación:** 6,432 m²
- **Número de módulo del campo:** 3
- **Superficie captación de módulo:** 2,141 m²
- **Rendimiento del módulo óptico:** 0,74
- **Coeficiente de pérdidas:** 1,28 W/m².K
- **Modelo comercial:** Viessmann VITOSOL 200-T SP2
- **Acumulación ACS Solar:** 500 l



Figura 3.10: Captador Solar de Tubos de Vacío VITOSOL 200T.

Como se ha comentado anteriormente, se dispone de 2 unidades de tratamiento de aire, también denominadas climatizadoras. Ambas unidades tienen las mismas características, detalladas a continuación:

- **Caudal máximo de impulsión:** 8400 m³/h
- **Capacidad de refrigeración:** 61 kW
- **Caudal tratado:** 10,47 m³/h
- **Capacidad de calefacción:** 64 kW
- **Caudal tratado:** 5,54 m³/h
- **Modelo comercial:** Servoclima CTA-8

Por último, a continuación se muestra el diagrama de instalación de los elementos anteriormente descritos.

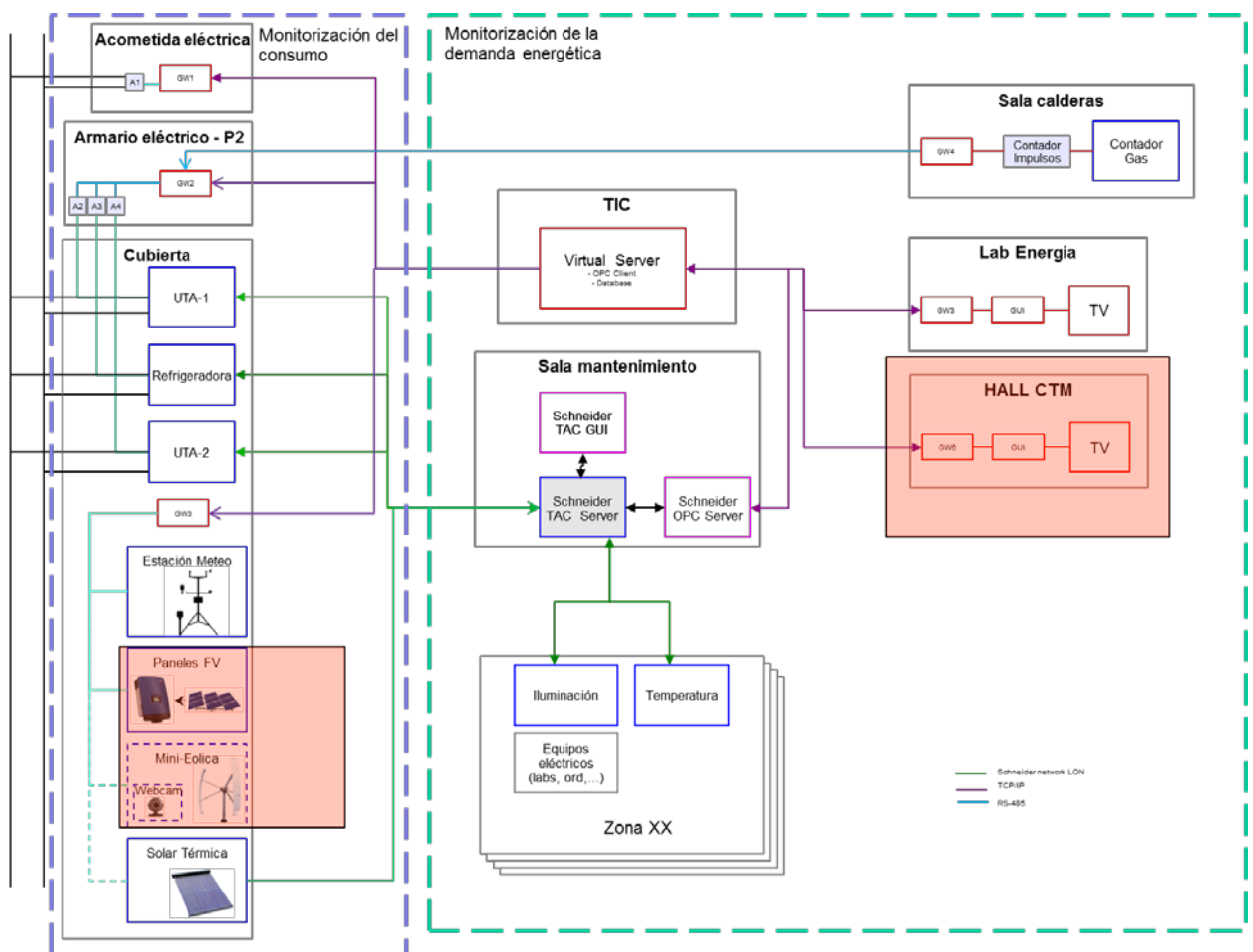


Figura 3.11: Diagrama de instalación de los equipos en edificio CTM [12]

Si bien en el alcance del proyecto preliminar la instalación de sensorización y elementos de monitorización se restringía al edificio CTM, durante el transcurso del proyecto se decidió ampliar la instalación de equipos de monitorización al edificio Gaia, ubicado en Terrassa y sede de uno de los miembros del consorcio, el Centro de innovación electrónica – Motion Control and Industrial Applications (MCIA).

El edificio Gaia se encuentra ubicado en el Campus Terrassa, y su reciente construcción facilitó la instalación de algunos sistemas de medición y adquisición de datos.



Figura 3.12: Edificio Gaia, en Terrassa

Los horarios de trabajo del edificio son los mismos que el edificio CTM. En este caso, el edificio dispone de un mayor número de equipamientos de clima. Cabe destacar que en este edificio se dispone de un sistema de Free-Cooling instalado en el CPD (Centro de Procesado de Datos), en el que se reutiliza la temperatura exterior para disipar el calor emitido por los servidores en aquellos periodos en los que la temperatura exterior es más baja que la interior. Además, el calor extraído, puede ser recirculado por el sistema de ventilación durante el invierno, lo que genera un ahorro en climatización.

Los sistemas instalados en Gaia son los siguientes:

Caldera:

Dispone de una caldera de condensación de combustión a gas de 430kW de la marca REMEHA – Modelo Gas 310 ECO PRO. Sus principales características son:

- Potencia útil: (50/30°C): 425 kW.
- Cuerpo de caldera de aluminio fundido.
- Quemador de premezcla situado en el interior del intercambiador de calor.
- Rendimiento anual de hasta 109 % sobre el PCI
- Emisión de óxidos de nitrógeno (NOx) extremadamente reducidos: 34 mg/KWh (20 ppm).

- Intercambiador de aluminio.
- Temperatura de retorno mínima.
- Regulación de carga según selección modular (100% - 20%) u on/off.
- Presión de agua en servicio: Mínimo: 0,8 bar Máximo: 7 bar.
- Temperatura máxima de uso: 110 °C (Seguridad). Regulable: 20 – 90 °C.
- Emisión media de NOx (O₂= 0%): 20 ppm.

Bombas de calor:

Dispone de 2 bombas de calor, ambas de la marca AERMEC. Los modelos instalados son *NRA 650 H L 04* y *NRA 700 H L 04*.

Enfriadoras (Chillers)

Dispone de 2 enfriadoras de la marca AERMEC. Ambas son del modelo NRL 0700, cuyas características se detallan a continuación:

- **Potencia de refrigeración:** 154,98 kW
- **Potencia absorbida:** 61,02 kW
- **EER:** 2,54
- **ESEER:** 3,48
- **Clase Eurovent en frío:** D
- **Caudal de agua:** 26791 l/h
- **Pérdidas de carga:** 74 kPa

Climatizadoras:

Dispone de 3 climatizadoras de la marca Airlan. Tal y como se ha comentado más arriba, estos elementos son los encargados de mantener un correcto filtrado del aire, así como de garantizar la correcta temperatura y humedad en la instalación.

Los modelos instalados son el FM 237, FMA 155 y FMA 060.

4. Análisis de sistemas de climatización y adquisición de datos

Uno de los puntos más relevantes a la hora de definir los modelos ha sido caracterizar los tiempos de adquisición de datos necesarios para poder disponer de la información necesaria para aplicar los modelos. En este capítulo se detalla el análisis realizado para determinar las variables y tiempos de muestreo requeridos.

Para poder determinar las variables y muestreos, se ha analizado el consumo y comportamiento de las máquinas y elementos de climatización de los edificios. Asimismo, se han caracterizado las máquinas y el comportamiento del edificio a nivel térmico.

En primer lugar, ha sido necesario recabar información relevante sobre los sistemas de clima. En segundo lugar, se han identificado los sistemas de adquisición de datos. Por último, el equipo de sistemas ha diseñado la base de datos tecnológica necesaria para aplicar los modelos.

Los análisis y resultados que se presentan en este capítulo están recogidos en el paquete de trabajo 3 del proyecto GDO2CLIM, relativo a la *Caracterización de sistemas de climatización*. El detalle de los análisis y resultados puede consultarse en el entregable E3.1 - *Base de datos tecnológica para los equipos e instalaciones de climatización* [16].

4.1 Análisis de las variables y plan de datos de la maquinaria de clima

Con el fin de analizar las variables y sistemas más relevantes que influirán en la elaboración de los modelos de optimización de la gestión del clima, se han analizado las interacciones entre los distintos elementos de la climatización en el edificio.

Un sistema de climatización estándar dispone de sistemas de producción de frío/calor (calderas y enfriadoras), sistemas de distribución (distribución por 4 tubos), unidades terminales (Fan-coils), unidades de tratamiento de aire (UTA/climatizadoras), sistemas de absorción de aire, sistema de control. Para el caso de la planta piloto (Edificio CTM) se dispone además de generación de calor mediante energía solar térmica.

A continuación se muestra un diagrama de la disposición de dichos sistemas.

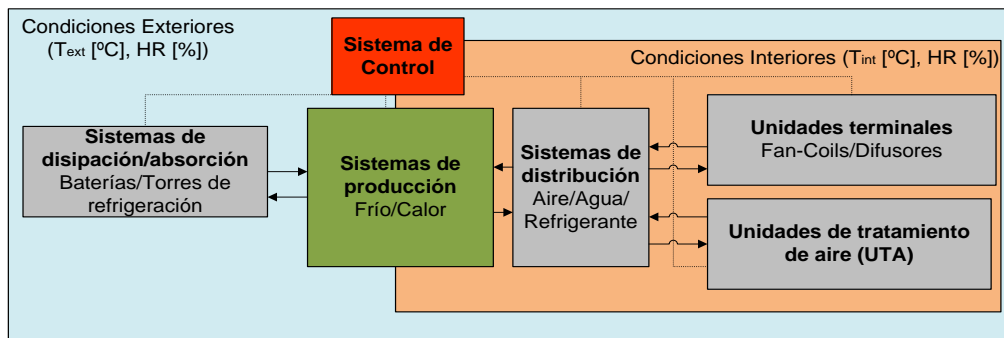


Figura 4.1: Esquema de un sistema de climatización

El equipo de expertos en digitalización de WATTABIT, conjuntamente con el equipo de expertos en eficiencia energética elaboró un estudio de las principales variables y periodos de muestreo de los equipos que conforman el sistema de climatización de la planta piloto.

El análisis se ha basado en la información teórica preliminar recopilada en el apartado 3.2 - *Soluciones de monitorización* de [16]. Tras realizar varias visitas al edificio para comprobar los puntos en los que se podrían adquirir los datos y que permitiesen la instalación de elementos de medida, el equipo de WATTABIT y ENERTIKA elaboraron un informe de variables a monitorizar para cada una de las máquinas. Más adelante, se definieron las profundidades de datos necesarias para cada variable que eran necesarias para caracterizar los modelos.

El análisis realizado es genérico para sistemas de climatización. Si bien se realizaron visitas a los sistemas del edificio CTM, durante la fase de análisis se decidió realizar el estudio a modo genérico para que el proyecto fuera fácilmente replicable.

Tal y como se presentará más adelante, tras varios meses de proyecto se decidió ampliar la captación de datos al edificio Gaia, ubicado en Terrassa y sede de uno de los miembros del consorcio, el *Centro de innovación electrónica – Motion Control and Industrial Applications* (MCIA). De este modo, se ampliaría la base de datos de equipos disponibles.

La información que se incluye a continuación ha sido extraída del documento de GDO2Clim E3.1 - *Base de datos tecnológica para los equipos e instalaciones de climatización* [16]

Tabla 4.1: Tabla resumen del análisis tecnológico realizado a los equipos de producción de frío y calor seleccionados y las variables a monitorizar.

Tecnología	Energía de entrada	Energía de Salida	Transformación	Eficiencia	Monitorización	Variable	Unidades
Calderas de combustible Fluido -Condensación -Baja temperatura	Gas Natural / Gas propano	Energía térmica (corriente de agua con temperatura cercana al os 60°C)	Combustión de un gas Transferencia de calor entre gases de combustión y el serpentín de agua	Estimada en operación: 95%	Directa	Temperatura Ambiente	°C
						Temperatura de Retorno	°C
						Temperatura de Impulsión	°C
						Consumo Combustible	kWh o kJ
					Indirecta	Carga Parcial	%
						Producción Térmica	kWh o kJ
Calderas de combustible sólido -Biomasa	Biomasa (astilla o pellet)	Energía térmica (corriente de agua con temperatura cercana a los 60°C)	Combustión de un sólido Transferencia de calor entre gases de combustión y el serpentín de agua	Estimada en operación: 90%	Directa	Temperatura Ambiente	°C
						Temperatura de Retorno	°C
						Temperatura de Impulsión	°C
						Consumo Combustible	kWh o kJ
					Indirecta	Carga Parcial	%
						Producción Térmica	kWh o kJ
Refrigeradoras por ciclo de compresión de vapor	Electricidad	Energía térmica (corriente de agua a temperatura cercana a los 7°C)	Transferencia de calor entre un fluido refrigerante, el aire exterior y la corriente de agua interior	Estimada en operación: COP/EER 3	Directa	Temperatura Ambiente (T seca)	°C
						Temperatura de Retorno	°C
						Temperatura de Impulsión	°C
						Consumo Eléctrico	kWh o kJ
					Indirecta	Carga Parcial	%
						Producción Térmica	kWh o kJ
Bomba de calor por compresión de vapor	Electricidad	MODOS REFRIGERACIÓN Energía térmica (corriente de agua a temperatura cercana a los 7°C) MODOS CALEFACCIÓN Energía térmica (corriente de agua a temperatura cercana a los 45°C)	Transferencia de calor entre un fluido refrigerante, el aire exterior y la corriente de agua interior	Estimada en operación: COP/EER 3	Directa	Temperatura Ambiente -Producción de calor: T húmeda -Producción de frío: T seca	°C
						Temperatura de Retorno	°C
						Temperatura de Impulsión	°C
						Consumo Eléctrico	kWh o kJ
					Indirecta	Carga Parcial	%
						Producción Térmica	kWh /kJ

Tecnología	Energía de entrada	Energía de Salida	Transformación	Eficiencia	Monitorización	Variable	Unidades
		MODO ACS Energía térmica (corriente de agua a temperatura cercana a los 60°C)					
Solar térmica (tubos de vacío)	Radiación Solar	MODO ACS Energía térmica (corriente de agua a temperatura cercana a los 60°C)	Conversión de la energía de radiación en energía térmica (sistema de absorción) y transferencia de calor al fluido (serpentín)	Estimada en operación: 40%	Directa	Temperatura Ambiente	°C
						Humedad del aire exterior	%HR
						Temperatura de Retorno	°C
						Temperatura de Impulsión	°C
					Indirecta	Radiación Incidente	W/m ²
Co-generación	Gas Natural	Energía térmica (corriente de agua a temperatura cercana a los 60°C) Energía Eléctrica	Conversión de energía química en energía térmica (combustión) y mecánica. Posterior transformación a energía eléctrica (generador) y transferencia de energía térmica al circuito de refrigeración (serpentín)	Estimada en operación: 27% conversión eléctrica 60% conversión térmica	Directa	Producción Térmica	kWh o kJ
						Temperatura Ambiente	°C
						Temperatura de Retorno	°C
						Temperatura de Impulsión	°C
					Indirecta	Consumo Combustible	kWh o kJ
						Carga Parcial	%
						Producción Térmica	kWh o kJ

Tabla 4.2: Tabla resumen del análisis tecnológico realizado al sistema de distribución y las variables a monitorizar

Sistema de conducción	Fluido caloportador	Transformación	Monitorización	Variable	Unidades
Tuberías de distribución de calor y frío	Agua	Perdidas de calor por el contorno (ΔT) Perdías de carga (ΔP)	Directa	Temperatura Ida	°C
				Temperatura de retorno	°C
				Caída de presión	Pa
			Indirecta	Perdidas térmicas	kWh o kJ

Tabla 4.3: Tabla resumen del análisis tecnológico realizado en las unidades terminales y unidades de tratamiento de aire (UTA) y las variables a monitorizar

Sistema de conducción	Fluido caloportador	Transformación	Monitorización	Variable	Unidades
Unidades terminales (fan-coils) Unidades de tratamiento de aire (batería de calentamiento y refrigeración)	Agua	Transferencia de calor aire-agua Perdías de carga (ΔP)	Directa	Temperatura Ida	°C
				Temperatura de retorno	°C
				Caída de presión	Pa
			Indirecta	Perdidas térmicas	kWh o kJ

Con las variables ya definidas y los sistemas caracterizados la siguiente fase del proyecto consistió en la definición del plan de adquisición de datos de medición y monitorización de los sistemas de clima.

La siguiente tabla, extraída del entregable *E3.1* de *GDO2Clim* [16], indica las frecuencias de adquisición de datos y los periodos mínimos necesarios para la correcta implementación de los modelos.

Tabla 4.4: Resumen del Plan de Adquisición de Datos

Sistema de Producción de calor y frío			
Equipo	Variable	Frecuencia Máxima	Periodo Mínimo
Caldera	Temperatura de Retorno	1 minuto	6 meses
	Temperatura de Impulsión		6 meses
	Consumo Combustible		6 meses
Refrigeradoras por ciclo de compresión de vapor	Temperatura de Retorno		3 periodos anuales de 1 semana
	Temperatura de Impulsión		3 periodos anuales de 1 semana
	Consumo Eléctrico		3 periodos anuales de 1 semana
Solar térmica (tubos de vacío)	Temperatura de Retorno		6 meses
	Temperatura de Impulsión		6 meses
	Radiación Incidente		6 meses
Sistema de Distribución			
Equipo	Variable	Frecuencia Máxima	Periodo Mínimo
Anillos de distribución de calor y frío	Temperatura Ida	1 minuto	6 meses
	Temperatura de retorno		
	Caída de presión		
Unidades Terminales y Unidades de Tratamiento de Aire			
Equipo	Variable	Frecuencia Máxima	Periodo Mínimo
Unidades Terminales y Unidades de Tratamiento de Aire	Temperatura Ida	1 minuto	6 meses
	Temperatura de retorno		
	Caída de presión		
	Temperatura aire entrada		
	Temperatura aire salida		
	Inyección de Vapor		
Otras variables comunas			
Equipo	Variable	Frecuencia Máxima	Periodo Mínimo
Estación meteorológica	Temperatura Ambiente		6 meses
	Humedad relativa	1 minuto	6 meses
	Velocidad viento	1 minuto	6 meses
	Dirección viento	1 minuto	6 meses
	Precipitaciones	1 minuto	6 meses

4.2 Sistemas de adquisición de datos

Se han analizado distintas alternativas de realizar las mediciones y adquisiciones de datos de las máquinas en función de su energía de entrada (electricidad o gas natural). Asimismo, en la medida de lo posible, se han integrado aquellas fuentes de datos existentes con el fin de añadir más información a los modelos.

4.2.1 Monitorización de consumos eléctricos

La monitorización de consumos eléctricos se distingue en función de si se desea leer consumos de acometida (consumo general del edificio) o submedidas (circuitos o máquinas específicas)

4.2.1.1 Consumo eléctricos en acometida general

En este caso, se dispone de varias alternativas para la lectura de datos. Se recomienda realizar mediciones sobre el contador de compañía, de este modo las lecturas para la simulación de tarifas es más fidedigna a la que se obtendrá por parte de la comercializadora.

Sin embargo, en este caso, en caso que haya algún error en la configuración del contador o los transformadores de medida, no se podrá detectar. Para detectarlo, se deberán realizar mediciones con equipos de lectura temporal y comparar las lecturas con el contador de compañía.

Lectura GSM a contador fiscal – protocolo IEC-870-5-102

Para aquellos contadores fiscales con módem de compañía instalado se pueden obtener las lecturas mediante un software de telellamada a contadores. Todo módem de compañía dispone de una identificación de número de teléfono, al cual se puede acceder libremente.

Los parámetros que se precisa conocer para acceder al contador son los siguientes:

- Punto de medida (P): Se puede consultar a través del contador
- Clave de acceso (r): Se puede consultar a través del contador
- Contraseña (generalmente 1 o 7, según distribuidora)

El contador dispone de las lecturas de energía cuarto-horarias, para energía activa, reactiva inductiva y reactiva capacitiva, tanto para importadas como exportadas.

Lectura IP a contador fiscal – protocolo IEC-870-5-102

En caso que el contador no esté telegestionado por la distribuidora, es decir, no disponga de módem de envío de datos, se podrá instalar un módem propio para lectura IP según características del contador.

Los contadores fiscales para tarifas 3.0 o superiores (3.1 y tarifas 6.x) generalmente disponen de un puerto de comunicaciones tipo RS485, a través del que realizar las lecturas mediante el protocolo IEC-870-5-102. Dicho puerto corresponde a un puerto de comunicación serie. En este caso, se debe configurar el módem con los parámetros de comunicación serie que se detallan a continuación:

- Baudrate: Velocidad de transmisión (9600, 19200, 38400, etc...)
- Paridad: Control de paridad de la trama (Par, Impar o Ninguna)
- Número de bits de trama (7, 8, 9...)
- Número de bits de Stop (0, 1...)

Asimismo, el protocolo IEC-870-5-102 debe parametrizarse para acceder al contador, con los mismos parámetros que se han indicado en el caso de lectura GSM (punto de medida, clave de acceso y contraseña).

A continuación se puede visualizar un ejemplo de contador fiscal monitorizado mediante lectura IP a través del protocolo IEC-870-5-102:



Figura 4.2: Ejemplo lectura IP mediante IEC-870-5-102

Lectura a través de sonda óptica

En caso que el contador no disponga de puerto de conectividad de datos serie (puerto serie RS485), se puede realizar la lectura de datos usando sondas ópticas de lectura. Existen 2 alternativas:

- Lectura de protocolo IEC-870-5-102 a través de puerto óptico
- Lectura de pulsos a través del indicador de energía activa/reactiva

En el primer caso, se dispondrá de la misma cantidad de datos que en los casos descritos anteriormente. En el caso de realizar lecturas de pulsos, la precisión de las lecturas será ligeramente inferior, debido a que se realiza un muestro periódico y puede haber error de medición introducidos por la sonda óptica (ruidos, problemas de lectura por posicionamiento incorrecto, desprendimiento de la sonda tras cierto tiempo...).

En este caso, se dispone de diversas alternativas para transmitir el conteo de pulsos, contando los pulsos mediante un hardware con entrada de conteo de impulsos o conectando una sonda modbus directamente a un módem compatible con ese protocolo.

A continuación se puede observar una instalación de lectura de pulsos con sonda (sonda Circutor Readwatt):



Figura 4.3: Lectura mediante sonda óptica

4.2.1.2 Lectura de submedidas eléctricas (circuitos o máquinas)

En caso de desear analizar los consumos parciales de un edificio, ya sean circuitos de iluminación, clima o fuerza o máquinas específicas, se dispone de 2 alternativas principales, lectura con analizadores de redes de medida directa o indirecta.

Para facilitar la monitorización es importante que los analizadores/contadores dispongan de puertos de lectura de datos. La alternativa más básica para la lectura automatizada de lecturas es disponer de una salida de pulsos, que indica el consumo de energía basado en pulsos eléctricos mediante relaciones de tipo 1000imp/kWh, 200imp/kWh, etc.

Se recomienda la utilización de analizadores/contadores con puertos de lectura más sofisticados, como por ejemplo lectura a través del puerto RS485 mediante protocolo Modbus. Este protocolo es compatible con gran cantidad de dataloggers. Además, en caso de pérdidas de comunicación o errores en el conteo de impulsos, puede realizar lecturas absolutas del analizador, con lo que es imposible perder consumo monitorizado. Las lecturas transmitidas siempre estarán sincronizadas con las lecturas del propio analizador.

Lecturas con analizadores de medida directa

Existen analizadores de redes (o contadores, en su versión más simplificada) capaces de realizar lecturas eléctricas de submedidas de forma directa, sin necesidad de utilizar transformadores de lectura.

Estos equipos pueden ser monofásicos o trifásicos, y tienen una limitación en el amperaje máximo permitido. Generalmente, los analizadores monofásicos se limitan entre 32 A y 40 A. Mientras que los trifásicos tienen limitaciones de unos 63 A.

La principal desventaja de estos medidores es que conllevan un corte en el suministro eléctrico de la línea o líneas que se desea monitorizar. Sin embargo, son equipos que resultan más económicos y, además, se prescinde de la compra de transformadores de medida externos.

Lectura con analizadores de medida indirecta

Los analizadores de redes indirectos son aquellos que precisan de transformadores de medida de corriente para realizar las medidas. Estos equipos tienen un funcionamiento muy similar a los de medida directa, la principal diferencia es que la limitación de amperaje de entrada está limitada generalmente a no más de 5 A. Esta limitación es la que conlleva la instalación de transformadores de medida de corriente, de modo que se establece una relación primario-secundario que permite determinar la corriente real del circuito en base a la conversión de amperaje.

A éstos equipos se les debe indicar cuál es la relación de transformación, tanto en corriente como en tensión. Generalmente, para equipos circuitos de baja tensión no es necesario indicar la relación de transformación, puesto que admiten hasta 400 V en sus entradas.

La principal ventaja de estos equipos es la facilidad de instalación. Si se combinan estos equipos con transformadores de medida de corriente de núcleo partido (o abierto), no se precisan cortes de suministro en el circuito durante su instalación. Esta ventaja es muy valorada en aquellos circuitos que no pueden ser desconectados.

A continuación se puede observar un ejemplo de instalación con contador indirecto (Circutor CVM-Mini) y 3 transformadores de medida de corriente instalados en acometida.

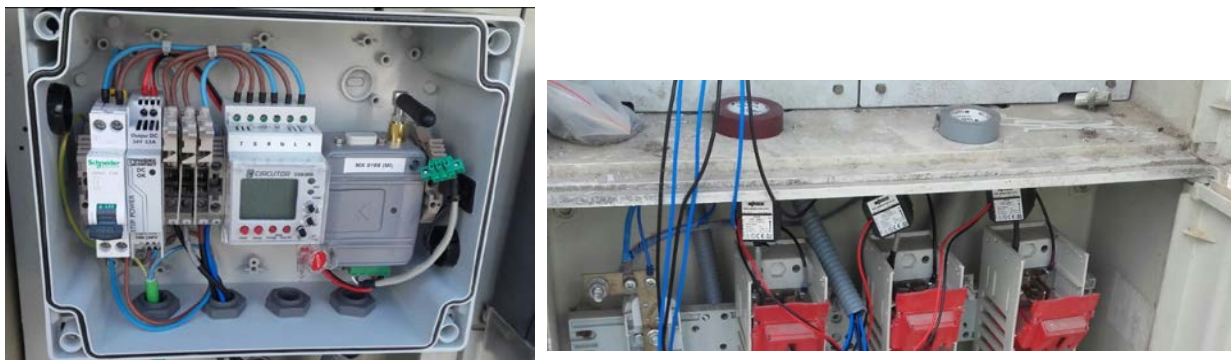


Figura 4.4: Lectura mediante contador de medida indirecta

4.2.2 Monitorización de consumos de gas

La monitorización de consumos de gas presenta más restricciones de normativa que las eléctricas debido a que los contadores se encuentran en zonas AtEx (Atmosferas Explosivas). En estos casos, se describe la limitación de corriente y tensión de los equipos conectados a los contadores de gas.

En cualquier caso, se dispone de diversas alternativas que cumplen la normativa. Siendo posible instalar emisores de impulsos tipo reed homologados por los fabricantes. Estos equipos pueden conectarse, en el exterior de la zona AtEx, a dataloggers con los aislamientos eléctricos requeridos.

La monitorización de estos contadores se basa principalmente en el conteo de pulsos mediante una relación imp./kWh.

Uno de los problemas más comunes en este tipo de entornos es la falta de suministro eléctrico cercano a los contadores por medidas de seguridad y normativa. En estos casos,

se recomienda la utilización de equipos autónomos de conteo de pulsos, con transmisión de datos mediante radiofrecuencia. Para aquellos lugares en los que exista cobertura SIGFOX, se recomienda el uso de estos dispositivos, homologados AtEx y con muy buenos resultados de monitorización.

4.2.3 Monitorización de condiciones meteorológicas

Las condiciones meteorológicas pueden ser obtenidas a través de una estación meteorológica instalada en campo o a través de servicios on-line de procesamiento de datos meteorológicos.

En el caso de las plantas piloto, se han obtenido las variables directamente de la estación meteorológica que ya existía en el emplazamiento. En caso de no disponer de dicha estación, se habría optado por integrar los datos del servicio meteorológico proporcionado por, por ejemplo, openweathermap.com o weatherunderground.com.

Comentar que el servicio de *openweathermap* está disponible en la plataforma W-Manager de WATTABIT, utilizada en el proyecto.

4.2.4 Monitorización de datos de control y detalle de máquinas

Con el fin de evitar el despliegue masivo de sensores y equipos de transmisión de datos en los edificios objeto del proyecto, una alternativa más económica es la de integrar los datos ya existentes en la instalación. En este caso, se han obtenido datos del software SCADA de gestión de clima de los fabricantes Siemens y Schneider.

Gracias a dicha integración ha sido posible disponer de variables de detalle de funcionamiento de las distintas máquinas de generación de frío y calor de la instalación.

4.3 Diagrama de los sistemas de adquisición de datos en edificio CTM

A continuación se muestra el diagrama de los sistemas de medida y adquisición de datos disponibles e instalados en una de las plantas piloto (Edificio CTM).

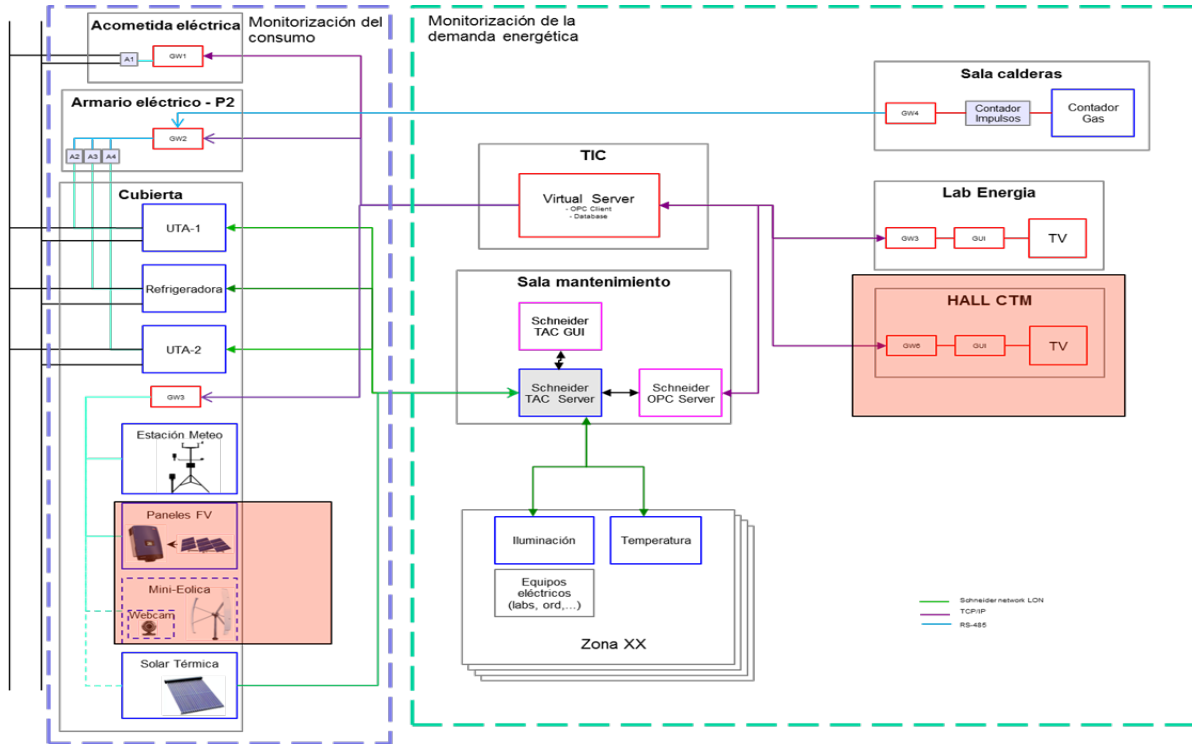


Figura 4.5: diagrama de los sistemas de medida y adquisición de datos

Los datos adquiridos son centralizados en una base de datos no relacional de series temporales TSDB (Time Series Database). Este tipo de bases de datos son óptimas para el manejo de datos provenientes de distintas fuentes de datos, de forma asíncrona. La visualización de datos se ha llevado a cabo usando 2 aplicaciones distintas. Durante la fase de modelado, los datos se visualizaron a través de una aplicación web de tratamiento de datos, así como en Matlab.

Una vez los modelos ya habían sido diseñados y de cara a implementarlo en un entorno más potente y atractivo para el usuario, se habilitaron APIs para la conectividad de datos con la plataforma W-Manager desarrollada por WATTABIT.

Se puede consultar el detalle de los datos obtenidos por las distintas máquinas en el Anexo A: Datos monitorizados en planta piloto.

5. Modelos de optimización de curva de demanda y vida útil remanente

La coordinación del desarrollo de los modelos y algoritmos de optimización de la gestión se ha llevado a cabo asegurando una fluida comunicación entre los equipos de trabajo de CTM y CMIA. Se ha ofrecido apoyo a nivel conceptual energético por parte del equipo de WATTABIT y ENERTIKA.

Queda fuera del alcance de este TFM detallar la programación de los modelos y algoritmos de optimización. De todos modos, como parte de las tareas de coordinación del proyecto, se han adquirido nociones básicas en el tratamiento de información y modelado.

Tal como se ha comentado anteriormente, el objetivo del proyecto GDO2Clim es el desarrollo de herramientas para mejorar la eficiencia energética en instalaciones de climatización a través de la monitorización de los distintos elementos instalados. En este sentido, se han desarrollado dos módulos claramente diferenciados. El *módulo de Supervisión Energética de Instalaciones de climatización para la optimización de la curva de Demanda (OpCD)* y el *módulo de Análisis de Eficiencia Mantenimiento y Vida Remanente (ManVR)*.

En este capítulo se describe la metodología utilizada para el desarrollo de los módulos, y los objetivos y funcionalidades de ambos módulos. Parte de la información contenida en este capítulo se ha basado en la información recopilada de los documentos de GDO2Clim *E5.1 Optimización de Consumos y Reducción de la Curva de Demanda* y *E6.2 Algoritmo de Estimación de Vida Remanente*, pertenecientes a los paquetes de trabajo *PT5* y *PT6* respectivamente. **Fuente especificada no válida. Fuente especificada no válida..**

5.1 Metodología de desarrollo

La metodología de desarrollo que se ha establecido permite que los miembros del consorcio encargados del desarrollo puedan ser ágiles a la hora de desarrollar los modelos. Asimismo, tiene en cuenta que los otros 2 miembros del consorcio no son especialistas a nivel de desarrollo pero si a nivel de gestión energética y de tratamiento de datos. De este modo, la metodología hace énfasis en la correcta coordinación y transferencia de información entre los miembros del consorcio.

Se han definido 3 fases principales:

- Análisis tecnológico y de la información disponible
- Formulación del modelo por tecnología y metodología de ajuste

- Presentación y análisis por los miembros del consorcio especialistas en energía



5.1.1 Análisis tecnológico y de la información disponible

Fase preliminar en la que se realiza el estudio del comportamiento termodinámico y de transferencia de calor producido en los equipos. Asimismo, se realiza la caracterización de la envolvente y de los factores que afectan al funcionamiento de los equipos.

Por último, se analiza la información disponible y calidad de los datos disponibles para la elaboración del modelado. En el *Anexo B: Tratamiento y estandarización de datos* se detalla el pre-procesado de datos necesario para garantizar la calidad de los datos de entrada en los módulos desarrollados. Asimismo, en el *Anexo C: Resultados de la metodología de desarrollo de los modelos* se detallan los resultados de los análisis realizados durante la metodología de desarrollo de los modelos.

En esta fase el equipo de CTM y MCIA recibe el apoyo de los expertos en gestión energética para garantizar que los datos utilizados y conocimientos energéticos son asimilados y aplicados correctamente.

5.1.2 Formulación del modelo por tecnología y de la metodología de ajuste

En esta fase se analizan las distintas alternativas tecnológicas para la implementación de modelos de optimización de funcionamiento de los equipos de climatización. Aquí los principales protagonistas son el personal de CTM y MCIA, cuya experiencia en el desarrollo

de modelos y algoritmos de inteligencia artificial y su conocimiento del estado del arte de las tecnologías les permite identificar fácilmente la mejor tecnología a desarrollar.

En esta fase se definen las relaciones entre las distintas variables monitorizadas y sus interacciones con los parámetros proporcionados por los fabricantes de los equipos.

En el *ANEXO D: Resumen del análisis de modelados* se dispone de un análisis de las distintas tecnologías analizadas por MCIA y CTM para la elaboración de los modelos y algoritmos.

5.1.3 Presentación y análisis por los miembros del consorcio especialistas en energía

En esta fase se realiza la presentación de resultados obtenidos a los miembros expertos en gestión energética. Es aquí donde se presentan las distintas tecnologías analizadas y los resultados obtenidos tras ejecutar preliminarmente los algoritmos. Asimismo, en caso que alguna de las tecnologías de equipos de climatización escogidos se considere no relevante para el estudio, se procede a acotar o ampliar el alcance.

En este punto es en el que se pueden realizar ajustes en alguna de las relaciones de variables, así como definir ciertos parámetros de confort que no hayan sido ajustados correctamente.

Cuando el consorcio ha acordado las tecnologías a utilizar y ha validado las relaciones entre las variables, se puede proceder a realizar los desarrollos de los módulos y algoritmos.

5.2 Módulo de supervisión energética de instalaciones de climatización para la optimización de la curva de demanda (OpCD)

Éste módulo ha sido diseñado para poder trabajar con distintas fuentes de datos disponibles en la instalación y sus principales funcionalidades son las siguientes:

- Modelado automático de consumos eléctricos y de gas natural
- Extracción de patrones de comportamiento en el funcionamiento de equipos de climatización
- Determinación del punto óptimo de operación de los equipos
- Optimización de la demanda de cargas por equipo

- Propuesta de órdenes de encendido/apagado
- Control sobre las consignas de operación

A continuación se muestra el diagrama de bloques para la implementación de los distintos bloques que forman el módulo de OpCD [17].

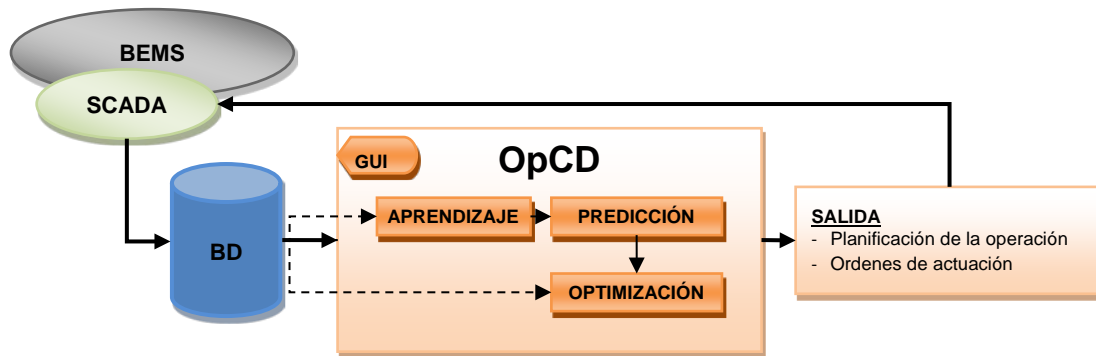


Figura 5.1: Esquema de bloques del módulo OpCD

Tal y como se puede observar, en primer lugar es imprescindible disponer de los datos monitorizados de las máquinas y consumos generales. Con esta información se conformó la base de datos tecnológica que serviría como base de los desarrollos.

En primer lugar, se destaca el bloque de aprendizaje. La principal funcionalidad de este bloque es analizar los datos monitorizados y encontrar patrones de comportamiento en el uso de las máquinas. Con estos patrones ya clasificados, se puede proceder a desarrollar el bloque de predicción. En este bloque se ha realizado el modelado de las inercias térmicas de una zona en función de la operación de los equipos de climatización y las condiciones de operación: El algoritmo analiza el impacto térmico en el edificio de los equipos de climatización. Asimismo, se genera un modelo matemático, lo cual permite predecir la evolución térmica de la zona según la operación de los equipos.

El bloque de predicción dispone de la información del bloque de aprendizaje, tanto de los datos históricos como de la clasificación de los patrones. Dado que el sistema dispone de información adicional externa a los equipos, como la temperatura y humedades exteriores, comportamiento térmico del edificio, entre otras. De este modo, el sistema es capaz de realizar predicciones de consumo y comportamiento basado en esa información.

Por último, se dispone del bloque de optimización. Este bloque obtiene datos de la base de datos en tiempo real, así como los resultados del bloque de predicción. Gracias a esta información, el bloque es capaz de determinar el punto de trabajo y las temperaturas de consigna de los equipos para que su funcionamiento y demanda energética sea óptima.

Cabe destacar que la optimización de funcionamiento siempre debe cumplir las condiciones de confort en el edificio.

En el bloque de optimización se ejecuta un algoritmo de desagregación de cargas, necesario para poder determinar qué condiciones de funcionamiento deben cumplir cada una de las máquinas introducidas en el modelo.

Los resultados obtenidos por el módulo OpCD representan las órdenes de operación de los sistemas de clima así como las actuaciones propuestas a los gestores. Estos outputs se envían al sistema SCADA (o EMS, con capacidades de visualización de órdenes).

5.3 Módulo de Análisis de Eficiencia Mantenimiento y Vida Remanente (ManVR)

El módulo de análisis de eficiencia de mantenimiento y vida remanente se ha dividido en 3 fases. Una primera fase de análisis de la degradación del rendimiento de las máquinas de climatización en base a los datos históricos monitorizados. La fase de desarrollo de los algoritmos de cálculo de las tendencias de la eficiencia energética de los equipos. Y una última fase de validación de los resultados en condiciones controladas (operación de plantas mediante simulaciones en laboratorio).

5.3.1 Fase de análisis de datos históricos

Durante la primera fase, ha sido necesario un trabajo coordinado entre los distintos miembros del consorcio puesto que los expertos energéticos han decidido qué umbrales de degradación se debían establecer para determinar la vida remanente de los equipos. Si bien los límites de los umbrales son configurables en el modelo desarrollado, los conocimientos de los expertos energéticos y de los operadores de los equipos fue crucial para el desarrollo de los algoritmos.

En una primera aproximación de la fase de análisis de datos se decidió utilizar un tiempo de muestreo de la potencia de entrada y salida de las máquinas para determinar el COP (Coeficiente de Operatividad o Coeficiente de Rendimiento) de los distintos equipos. En este módulo, el análisis se ha restringido a los equipos de generación de frío (enfriadoras) y calor (calderas). Los resultados obtenidos tras analizar el COP usando datos instantáneos de potencia demandada y entregada fueron poco útiles. Esto se debía a que la inercia de las máquinas entre la potencia de entrada y salida era superior a los tiempos de muestreo de los datos. Asimismo, se detectaron picos de consumo en el encendido de las máquinas, lo que conllevaba a errores en el cálculo del COP.

Finalmente, con el apoyo de los distintos miembros del consorcio, se determinó que una buena alternativa al cálculo del COP consistía en agregar los datos de forma horaria para calcular el COP de las máquinas. En este caso, los resultados fueron coherentes con lo esperado y no presentaban variaciones puntuales.

A continuación se pueden observar las diferencias entre el muestreo en tiempo real y el agregado horario para la determinación del COP, tanto para las enfriadoras y calderas [18].

Comportamiento del COP en Enfriadora 1:

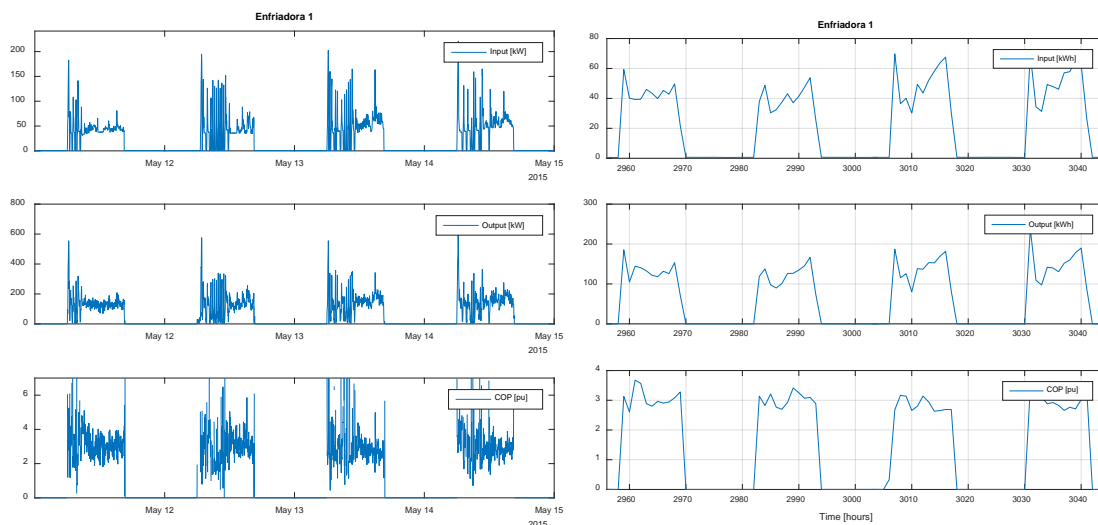


Figura 5.2: COP Enfriadora 1 (Temporal)

Comportamiento del COP en Calderas 1-2-3:

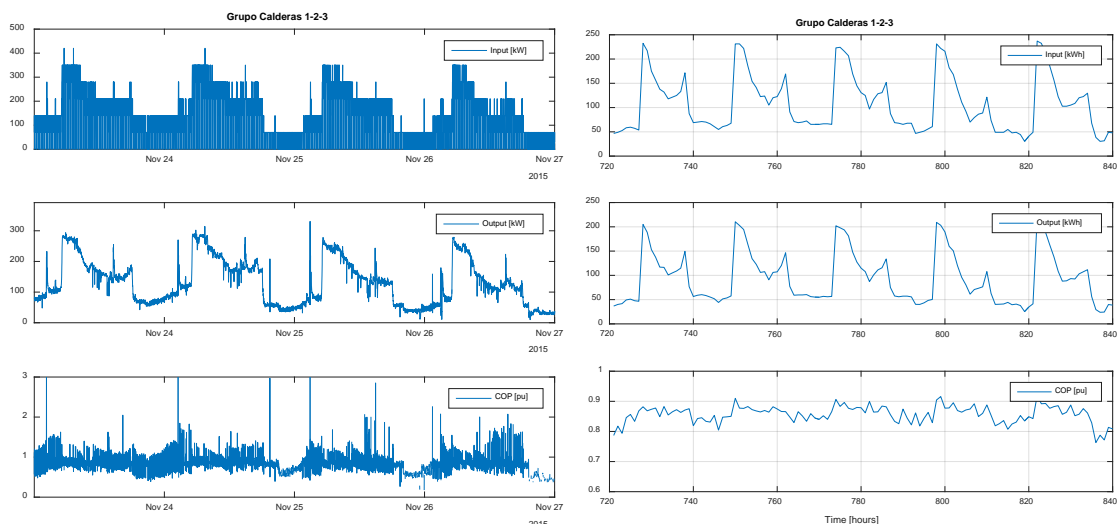


Figura 5.3: COP Calderas 1-2-3 (Temporal)

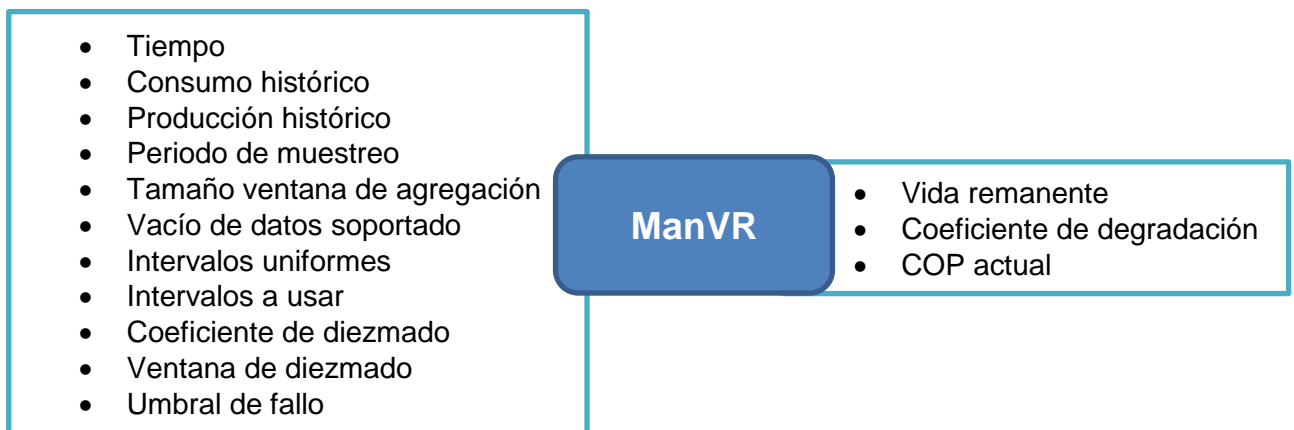
De forma análoga al análisis de la evolución del COP en el tiempo, el equipo de CTM y MCIA realizó el análisis del comportamiento del COP en función de la carga a la que trabajaban los equipos.

El muestreo de datos se organizó en intervalos de carga para visualizar con mayor facilidad el degradado del COP según la carga de los equipos.

Los detalles de dichos análisis se pueden consultar en detalle en el documento *E6.2 - Algoritmos de estimación de vida remanente, del paquete de trabajo PT6 - Algoritmos de mantenimiento y predicción de vida remanente de sistemas de climatización* del proyecto GDO2Clim [18].

5.3.2 Desarrollo de algoritmo de vida útil remanente

Con los resultados del análisis de degradación del COP en función del tiempo y del intervalo de carga, se definieron los parámetros de entrada del modelo para la determinación de la vida útil remanente. El modelo dispone de las siguientes variables de entrada y salida.



Las validaciones de *Figura 5.4: Modelo variables entrada/salida* Dado que el tiempo de proyecto para observar degradaciones en el COP de los equipos no permitía realizar validaciones coherentes. A pesar de ello, durante la validación de resultados se identificaron mejoras en el modelo implementado.

Dado que el modelo no tiene en cuenta la fecha de instalación de la máquina ni la vida útil teórica proporcionada por el fabricante, en caso de no detectar una degradación del COP no es capaz de determinar la vida útil remanente. Una mejora que se identificó durante la fase de presentación y validación de resultados fue la inclusión de esos parámetros a nivel de software de EMS para que, en caso que no exista una degradación del COP, la vida útil remanente máxima informada al usuario se corresponda con la teórica del fabricante.

6. Integración de los algoritmos en W-Manager

En este capítulo se presentan las tareas realizadas para integrar los algoritmos desarrollados por CTM y MCIA en la plataforma de gestión energética W-Manager, de WATTABIT. Esta plataforma es la encargada de integrar los datos monitorizados así como los módulos de optimización desarrollados en el proyecto.

De este modo, los gestores energéticos de ENERTIKA pueden realizar sus tareas de gestión de una forma más efectiva. Además, la plataforma dispone de un módulo de cálculo de ahorros en base a las medidas de eficiencia energética introducidas en los equipos, con lo que los gestores pueden cuantificar fácilmente el impacto de las medidas y algoritmos de la plataforma.

6.1 Descripción de los sistemas de WATTABIT

WATTABIT dispone de un vertical de IoT, cuyo punto central es la aplicación EMS denominada W-Manager. Esta plataforma es capaz de integrar datos de distintas fuentes, ya sea directamente de sensores y dataloggers o de fuentes externas. En este sentido, convertían W-Manager una plataforma idónea para la integración de datos y modelos del proyecto.

A continuación se muestra el diagrama de la arquitectura de sistemas de WATTABIT, en el que se puede apreciar la integración de los módulos OpCD y ManVR, como fuentes externas.

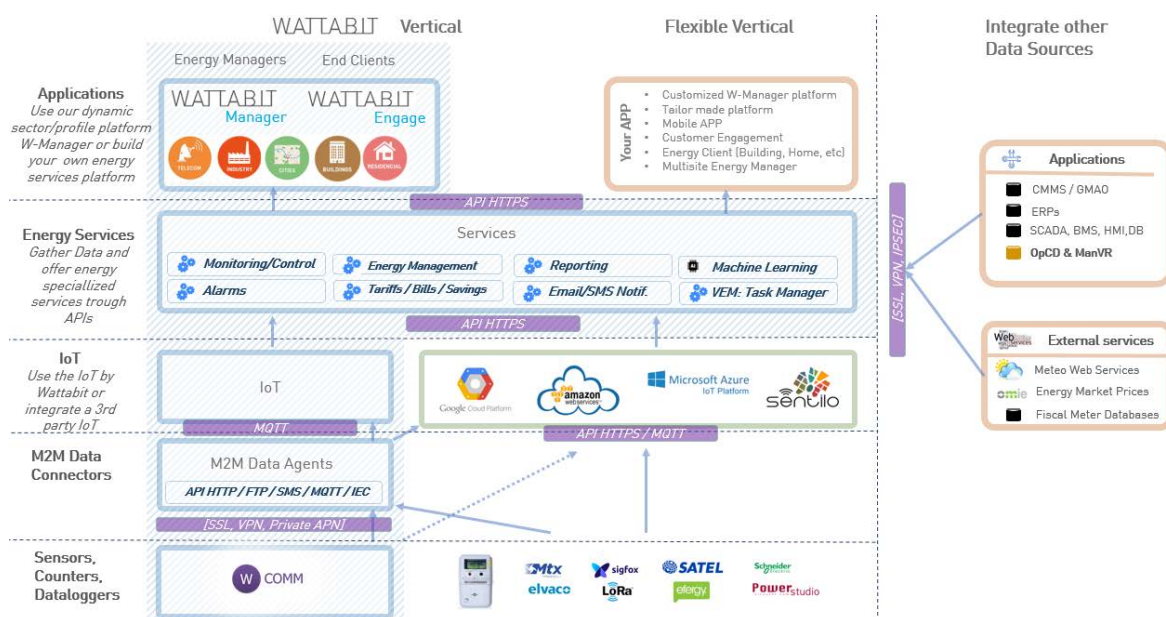


Figura 6.1: Diagrama IoT WATTABIT

La plataforma W-Manager dispone de varios verticales sectorizados, uno de ellos corresponde a Buildings (edificios), directamente relacionado con el proyecto. La contribución de los módulos OpCD y ManVR ha supuesto una mejora de las funcionalidades de la plataforma.

6.2 Integración de modelos desarrollados

La integración de datos en la plataforma se realiza mediante el uso de APIs. Para lograrlo, se han implementado APIs en WATTABIT para la publicación y consulta de datos. Asimismo, se han implementado APIs de ejecución de los modelos desarrollados por CTM y MCIA, instalados localmente en sus sistemas. Pese a no disponer de dichos algoritmos directamente en los sistemas de WATTABIT, gracias al uso de APIs es posible disfrutar de las funcionalidades en la plataforma W-Manager.

Si bien los datos y resultados de los modelos se han integrado en base a APIs, las pantallas de configuración y visualización en W-Manager se encuentran en fase de desarrollo. Sí que se dispone del diseño funcional, que se detalla en los siguientes apartados.

6.3 OpCD: Optimización de la Curva de Demanda

Se ha diseñado funcionalmente tanto el menú de configuración como el de visualización del módulo de optimización de la curva de demanda. A continuación se describe brevemente la interacción entre el usuario y la plataforma en relación al módulo OpCD. Este módulo dispone de las siguientes funcionalidades:

- Supervisión de consumos (monitorización)
- Predicción de la curva de demanda
- Desagregación de consumos
- Optimización del funcionamiento de máquinas de clima

6.3.1 Configuración

Los modelos de optimización de la curva de demanda disponen de 3 criterios de optimización, según las siguientes condiciones:

- Minimización de la fuente de energía primaria: energía consumida.
- Minimización de las emisiones de CO₂: cantidad de CO₂ equivalente.

- Minimización del costo de la energía primaria: costo monetario de la operación.

The image shows a software interface titled "Select the optimization criteria:". It contains three rows, each with a checked checkbox and a text input field. The first row is "Primary energy use" with a value of "100". The second row is "CO2 Emissions" with a value of "100". The third row is "Primary energy cost" with a value of "100". Each input field has a small icon to its right.

Figura 6.2: Panel de selección del criterio de optimización

El usuario puede seleccionar el criterio de optimización que mejor le convenga según sus necesidades. El hecho de que se puedan seleccionar varios criterios significa que se incluirán las restricciones de optimización de los criterios seleccionados. Al menos se debe seleccionar un criterio de optimización.

El usuario debe indicar las temperaturas mínima y máxima de confort deseadas. Esas temperaturas son otras restricciones en el modelo de optimización, ya que debe garantizar las condiciones de confort en el edificio.

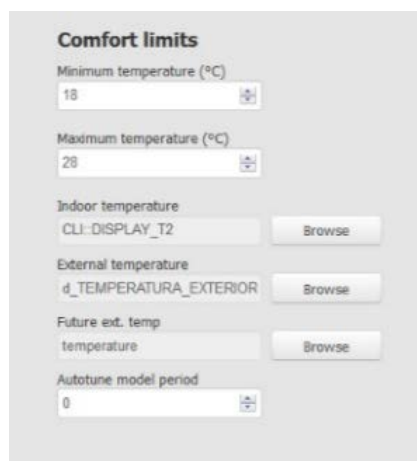
The image shows a software interface titled "Comfort limits". It contains several input fields and buttons. The first two are "Minimum temperature (°C)" with a value of "18" and "Maximum temperature (°C)" with a value of "28". Below these are four rows, each with a text input field and a "Browse" button: "Indoor temperature" with "CLI-DISPLAY_T2", "External temperature" with "d_TEMPERATURA_EXTERIOR", "Future ext. temp" with "temperature", and "Autotune model period" with a value of "0".

Figura 6.3: Panel de selección de las temperaturas de confort

6.3.2 Visualización

Una vez se ha parametrizado el modelo, se pueden visualizar los resultados. La plataforma presenta una visualización de datos multi-variable, tal y como se puede observar en la siguiente imagen:

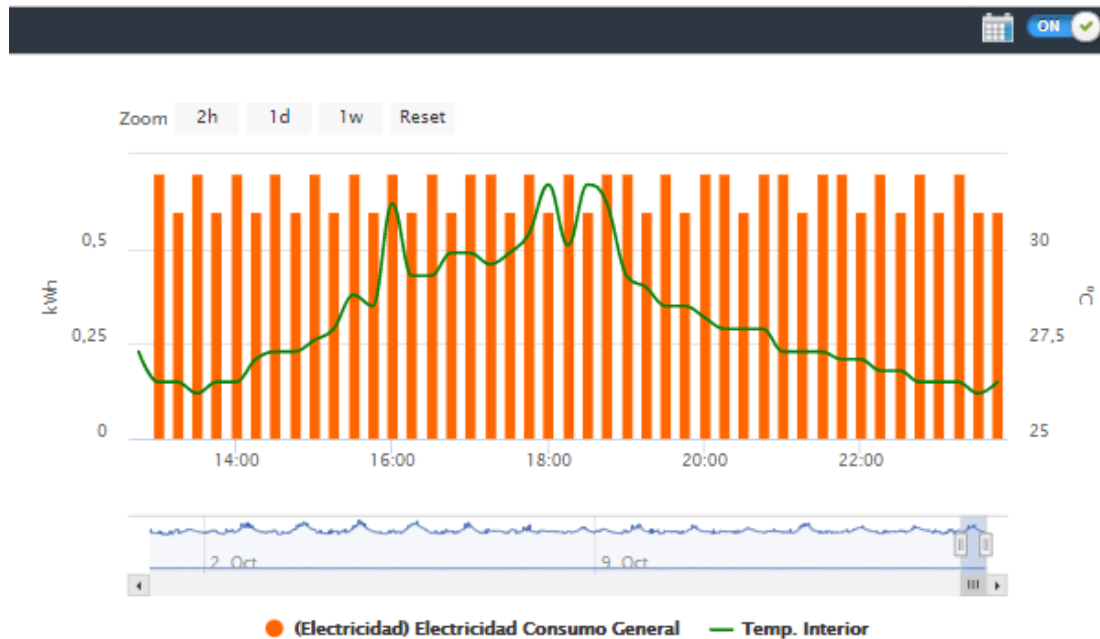


Figura 6.4: W-Manager, visualización multi-variable

Respecto a la visualización de demanda esperada, el sistema permite visualizar el consumo medido y el estimado. Debido a posibles errores en el cálculo del pronóstico de energía demandada, se representa un margen de confianza en el pronóstico.

En caso que el consumo medido exceda el margen de confianza del pronóstico, se marca el consumo en rojo y se alerta al usuario de que la demanda real ha excedido la demanda prevista.

A continuación se muestra la pantalla de visualización de predicción de demanda optimizada:

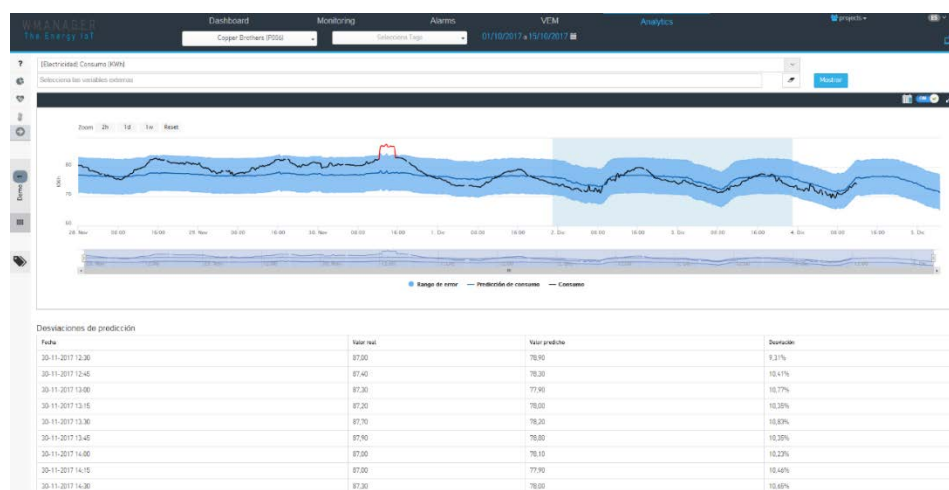


Figura 6.5: Visualización módulo OpCD

El modelo proporciona consignas de trabajo de encendido y apagado de máquinas. Gracias a la desagregación de consumos, se puede detallar el estado de cada máquina para una operación óptima.

La representación gráfica en este caso es en base cuarto-horaria. El usuario dispone de un listado de las acciones a realizar sobre cada máquina. Cabe destacar que, en caso de disponer de tecnología de actuación sobre máquinas (BMS, contactores, etc...) este proceso podría automatizarse.

Configuración de las máquinas

Fecha	Machine 1	Machine 2	Machine 3
01-10-2017 12:30	×	Apagado	×
01-10-2017 12:45	✓	×	×
01-10-2017 13:00	×	✓	✓
01-10-2017 13:15	✓	×	×
01-10-2017 13:30	×	✓	✓
01-10-2017 13:45	✓	✓	✓
01-10-2017 14:00	✓	×	×

Figura 6.6: Visualización estado de máquinas

Por último, el módulo de optimización de funcionamiento del clima dispone de una visualización de la desagregación de consumos. Cabe destacar que esta desagregación tiene sentido en periodos de agregación superiores a la hora, puesto que a nivel cuarto-horario se han identificado incidencias debidas a la inercia de las máquinas.

A continuación se muestra un ejemplo de representación gráfica del modelo de desagregación de cargas de clima:

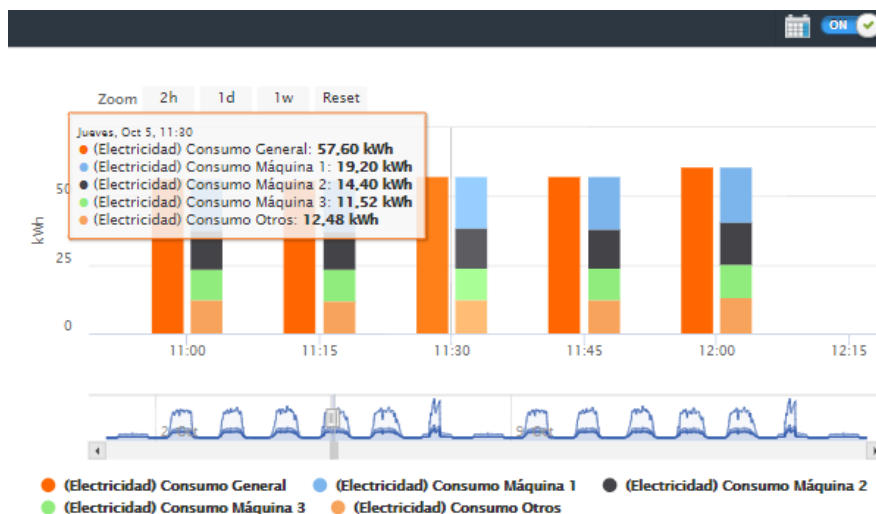


Figura 6.7: Visualización módulo desagregación

6.4 ManVR: Mantenimiento y predicción de vida remanente

El módulo de mantenimiento y predicción de vida remanente se complementa con el módulo VEM (Virtual Energy Manager) existente en la plataforma W-Manager. Este módulo permite la planificación de mantenimientos preventivos, predictivos y correctivos en la herramienta. A modo de ejemplo, a continuación se presenta la pantalla de planificación de mantenimientos en W-Manager:

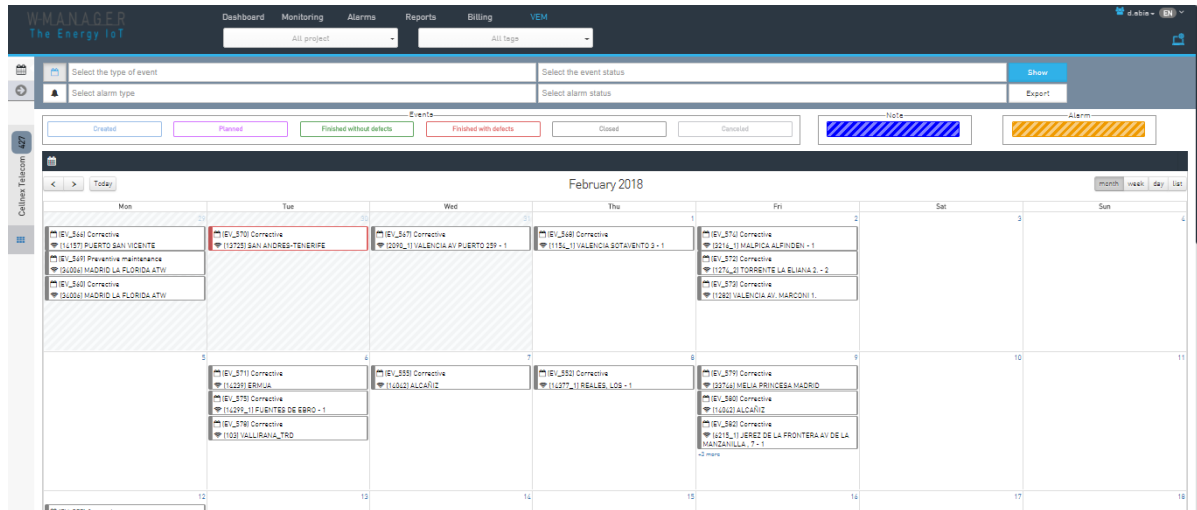


Figura 6.8: Visualización módulo mantenimientos

6.4.1 Configuración

A nivel de configuración del modelo de cálculo de vida remanente, es necesario introducir los datos de las máquinas que se desea incluir en el modelo. Como se ha descrito anteriormente, en la plataforma W-Manager se pueden introducir datos adicionales al modelo, como la fecha de instalación y vida útil teórica proporcionada por el fabricante. Los datos que el usuario puede introducir son los siguientes:

- Marca del equipo
- Modelo del equipo
- Familia (opcional)
- Subfamilia (opcional)
- Potencia nominal
- Vida teórica del fabricante (este parámetro sólo es necesario informarlo una vez por marca/modelo)

- Fecha de instalación

Cabe destacar que, en caso de introducir marcas y modelos que ya han sido introducidos anteriormente en la plataforma, el sistema puede completar los datos de vida teórica de forma automática, puesto que a medida de que se usa la plataforma se crea una base de datos de marcas y modelos de equipos de climatización.

6.4.2 Visualización

La visualización de la vida remanente se refleja como una tabla del inventario de la planta identificando el modelo exacto de los equipos. Se presenta información sobre la familia y subfamilia y la potencia.

Mediante el análisis continuo de los parámetros monitorizados en energía de entrada y energía térmica entregada, el modelo determina el COP y proporciona información sobre la vida útil remanente basada en la degradación. En caso de identificar degradaciones en el equipo, se indica al usuario que la vida útil remanente es inferior a la esperada.

En ese caso, el usuario puede hacer uso del módulo VEM para planificar mantenimientos preventivos en el equipo. Esta planificación se puede llevar a cabo de forma automatizada por la plataforma, de modo que al detectar una degradación, se planifique una actuación automáticamente y se notifique al gestor energético.

A continuación se presenta la pantalla de visualización de datos de vida útil remanente:

Modelo	Marca	Familia	Subfamilia	Potencia nominal (kW)	Vida Teórica (años)	Vida Útil (años)
ADI HT 275	Adisa	GENERADORES DE CALOR	Caldera	2,4	7	7
ADI HT 276	Adisa	GENERADORES DE CALOR	Caldera	2,4	5	5
ADI HT 277	Adisa	GENERADORES DE CALOR	Caldera	2,4	5	3
PRESTIGE HP 200	Fujitsu	EQUIPOS DE CLIMATIZACIÓN	Compresión eléctrica	4,5	4	4
JC 240 M	Ferrolli	EQUIPOS DE CLIMATIZACIÓN	Torre de refrigeración	4,2	4	4
COREPro LED Capsule	Mitsubishi Electric	ACUMULACIÓN ACS	Acumulación con apoyo solar	5,1	6	6

Figura 6.9: Visualización módulo vida útil remanente

7. Validación de los resultados obtenidos por los modelos

En esta sección se describen las validaciones funcionales de los sistemas implementados. Los análisis incluidos en esta sección se han obtenido de los datos recogidos en el paquete de trabajo *PT8 - Instalación experimental y validación*, documento *E8.1 - Validación de las aplicaciones software de optimización curva de demanda y de mantenimiento y vida remanente* [19].

Los datos que se han introducido en los modelos se han obtenido de los sensores instalados en el edificio CTM. El análisis de datos de este capítulo se basa en los datos de entrada y salida de los modelos.

7.1 Módulo de supervisión y predicción

El módulo de optimización y supervisión es el encargado de monitorizar el consumo general eléctrico y realizar las previsiones de consumo. Con el fin de realizar la validación del módulo, se han introducido en el algoritmo los valores de consumo eléctrico general. Tras varias simulaciones y con el modelo ya entrenado, se ha puesto en funcionamiento con los datos reales del piloto.

Al haberse probado con los datos de la línea de electricidad dedicada para el clima (enfriadoras), este módulo únicamente tiene sentido probarlo durante los meses en los que está en funcionamiento el circuito de generación de frío. De este modo, los datos obtenidos en las épocas del año sin contribución de las enfriadoras, el modelo proporciona datos que no son válidos para el análisis.

Las predicciones en las temporadas de invierno que se ofrecen en la plataforma subestiman el consumo de los equipos, de modo que el modelo proporciona datos considerados como errores. Estos datos son corregidos por el software de la plataforma para no desvirtuar el modelo.

El análisis de datos del modelo de predicción comprende desde el día 22/09/2016 hasta el 20/09/2017. Al disponer de todo un año de datos, podemos validar los resultados durante el tiempo de operación de las máquinas de frío. Asimismo, se podrá observar cómo durante los meses de frío el modelo proporciona datos no válidos.

Se ha realizado un análisis de datos en varios enfoques. En primer lugar se planteó analizar el consumo con detalle cuarto-horario, de modo que se comparaba el consumo real con la

predicción realizada. Los resultados presentaron gran cantidad de inexactitudes debidas principalmente a los siguientes motivos:

- Inercia térmica del edificio
- Inercia de las máquinas y sistema de frío
- Comportamiento de usuarios durante la operación de equipos (manipulación de ventanas y puertas, estancias ocupadas/vacías, etc...)
- Errores en las lecturas no corregidos con los algoritmos de pre-procesado de datos (outliers, huecos, desviaciones, pérdida de datos, etc...)

Tras comprobar que las predicciones a nivel-cuarto horario se asemejaban pero la precisión no era correcta, se planteó agregar los datos semanalmente y mensualmente. En estos casos, se obtuvieron resultados satisfactorios.

La Figura 7.1 muestra el análisis agregado mensual de la predicción de consumo y el consumo real medido:

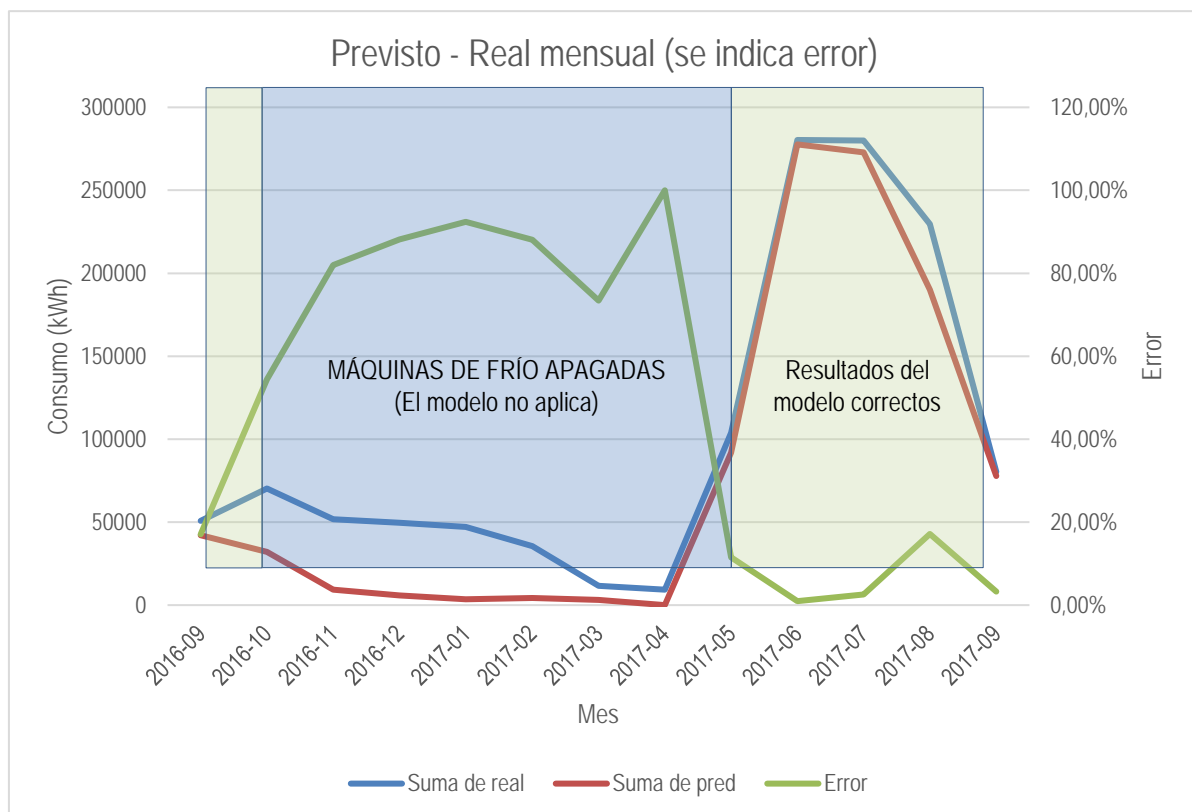


Figura 7.1: Predicción vs. Consumo real (con % error) [19]

Entre los meses de octubre de 2016 y mayo de 2017, el error de la previsión alcanza valores de hasta el 80-90%, esto es debido, tal y como se ha comentado más arriba, a que las máquinas se encontraban apagadas parcialmente (consumos despreciables, debidos a ventilación) y la predicción subestima dichos consumos.

Durante los meses más calurosos el modelo ajusta con mayor precisión la predicción de consumo con el consumo finalmente medido. A continuación se muestra una tabla con las lecturas reales y el consumo previsto para cada mes.

Tabla 7.1: Comparativa entre consumo real y predicción

Mes	Consumo real (kWh)	Predicción (kWh)	Error
2017-06	280.339,40	277.657,13	0,96%
2017-07	280.014,95	272.836,95	2,56%
2017-08	229.572,00	190.139,19	17,18%
2017-09	80.363,69	77.713,23	3,30%

El error de los meses de junio, julio y septiembre está por debajo del 3,30%, lo cual está dentro de los límites establecidos en el planteamiento de los algoritmos [19]. Se observa un incremento del error durante el mes de agosto. Esto se debe a varios factores, principalmente al cambio de comportamiento de los usuarios en el edificio durante ese mes. Agosto es el mes con menor ocupación y actividad del año, lo cual conlleva que haya días calificados como laborables en los que el consumo no se corresponda con la curva de carga típica de ese tipo de días. Además, durante el mes de agosto se llevaron a cabo labores de mantenimientos preventivos y correctivos aprovechando la baja ocupación del edificio, lo cual conllevó cambios en el comportamiento de las máquinas (apagadas forzadas, cargas de testeo, etc.)

Asimismo, con el fin de afinar en el análisis del error, se ha analizado la relación entre predicción y consumo real de las semanas de verano. Se puede observar como la línea de predicción sigue la tendencia de la línea de consumo real durante todo el verano salvo en el mes de agosto, en el que los modelos no son capaces de realizar las predicciones correctamente. De hecho, cabe destacar que las predicciones de agosto no son incorrectas, si no que se dan factores externos esporádicos no contemplados en el modelo.

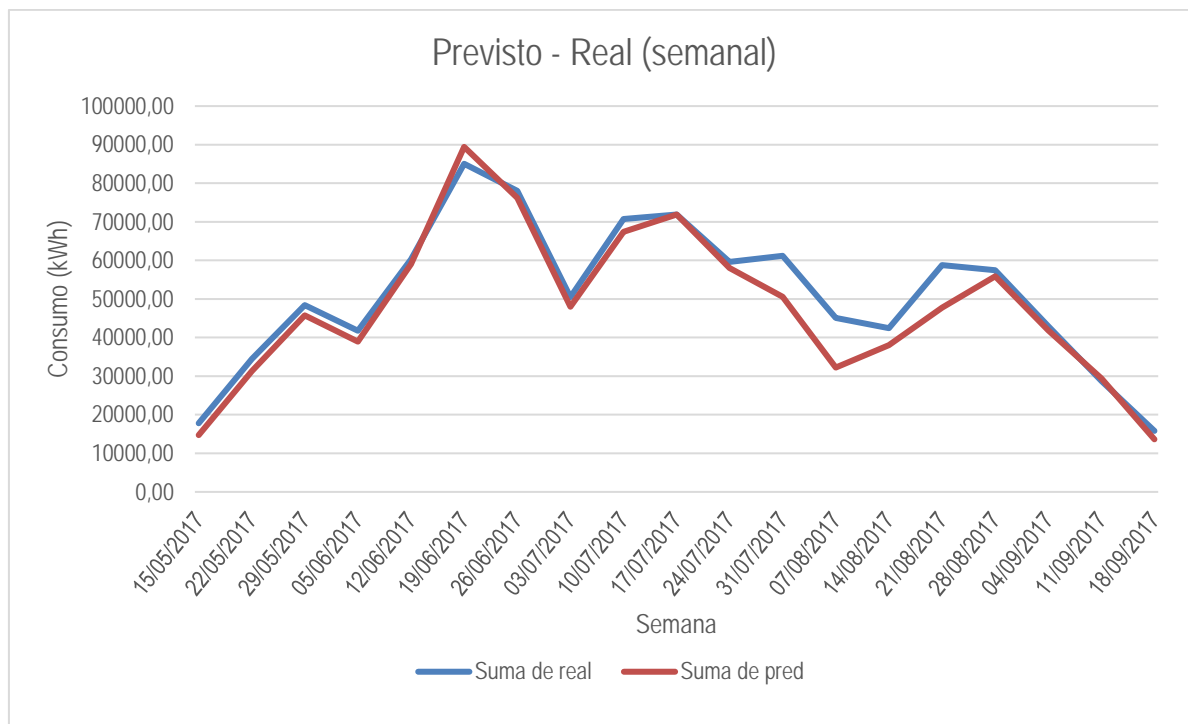


Figura 7.2: Análisis semanal de consumo vs. predicción

De este modo, se puede concluir que el modelo funciona correctamente durante las semanas de verano, semanas en las que las máquinas de frío tienen actividad [19].

A continuación se muestra la visualización de la predicción en la plataforma W-Manager. Se ha diseñado una franja con el rango de error permitido y se indica en otro color la línea de consumo cuando esta sobrepasa la franja de predicción.

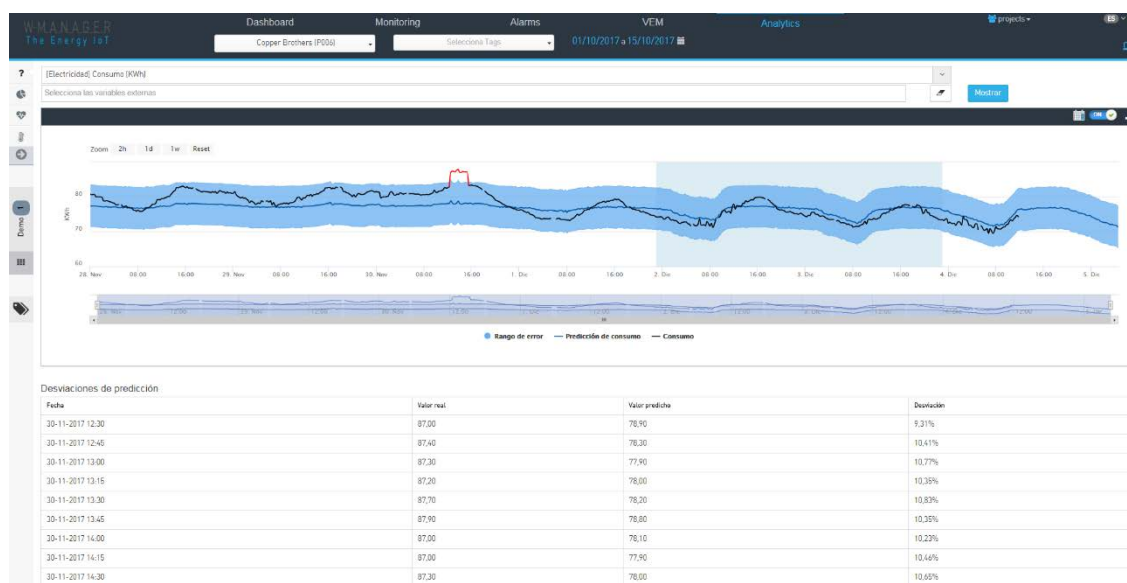


Figura 7.3: Visualización de predicción en W-Manager

7.1.1 Módulo de optimización de clima y desagregación de cargas (OpCD)

El módulo de optimización de clima y desagregación de cargas es el encargado de determinar el nivel de funcionamiento de las distintas máquinas de clima, así como de realizar la desagregación de máquinas según el consumo previsto.

El usuario puede establecer las temperaturas de confort del edificio y el modelo realiza los cálculos de carga de cada máquina para optimizar el consumo total en clima. A continuación se muestran los datos de temperaturas internas (promedio) en el edificio, en el que se puede observar cómo se encuentran dentro del rango de temperaturas de confort.

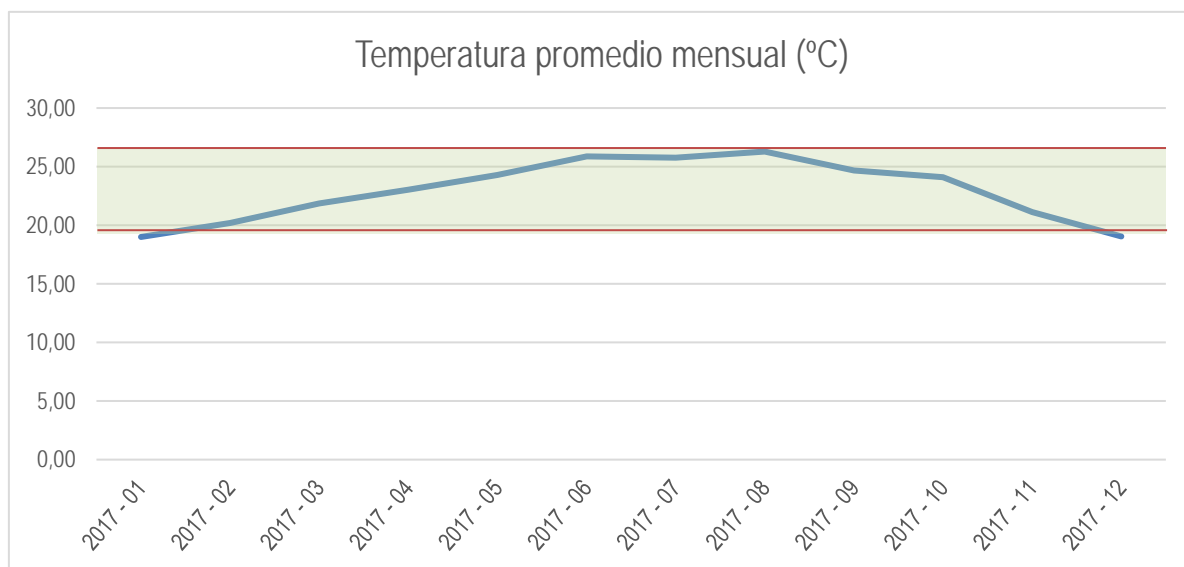


Figura 7.4: Temperatura interior promedio [19]

Tabla 7.2: Datos de temperatura interior en planta piloto

Mes	Temperatura interior promedio (°C)
2017 - 01	19,00
2017 - 02	20,20
2017 - 03	21,87
2017 - 04	23,03
2017 - 05	24,30
2017 - 06	25,89
2017 - 07	25,77
2017 - 08	26,29
2017 - 09	24,66
2017 - 10	24,11
2017 - 11	21,13
2017 - 12	19,03
Promedio anual	22,97

La desagregación de cargas respecto el consumo previsto también se ha validado. No ha sido posible realizar la comparativa con el subconsumo de cada máquina por falta de recursos de equipos instalados. A continuación se muestran los resultados obtenidos por el módulo de desagregación:

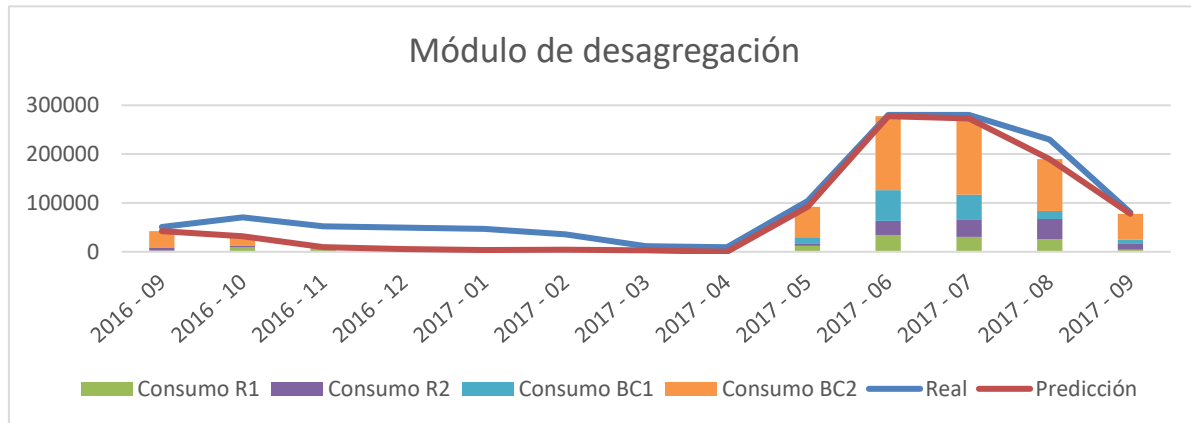


Figura 7.5: Desagregación de cargas de clima

De nuevo, se debe tener en cuenta que durante los meses en los que los equipos de frío no se encuentran en uso, tanto la predicción como la desagregación no aplican.

7.1.2 Módulo de vida remanente (ManVR)

El módulo de vida útil remanente se ha validado de forma teórica. Debido a las dificultades de detección de una degradación del rendimiento de las máquinas, no ha sido posible probar el modelo, puesto que éste proporcionaba resultados nulos. El hecho de que las máquinas no hayan presentado degradación no ha permitido observar cómo el modelo proporciona los años de vida útil remanente.

Como mejora al módulo a implementar en W-Manager, se propone introducir las fechas de instalación y de vida útil teórica para que la plataforma muestre los años de vida útil que le quedan a la máquina, independientemente de haber detectado o no degradación en su rendimiento.

8. Presupuesto

El proyecto GDO2Clim fue aprobado en el año 2014 y publicado en el BOE-A-2015-33, del viernes 2 de enero de 2015. Pertenece al programa Restos-Colaboración del año 2014.

El presupuesto total del proyecto es de 627.261 €. A continuación se indican los costes del proyecto por partidas presupuestarias:

Tabla 8.1: Costes del proyecto GDO2Clim por partida presupuestaria

Partida	2014	2015	2016	2017	Total	%
Gastos de personal	79.485	151.598	178.719	99.178	508.980	81%
Aparatos y equipos	1.544	5.632	6.132	2.921	16.229	3%
Otros costes directos	909	3.280	5.280	1.568	11.038	2%
Gastos de auditoria	4.000	4.400	4.800	4.400	17.600	3%
Costes indirectos	12.548	22.681	23.592	14.593	73.415	12%
Total	98.486	187.591	218.524	122.660	627.261	100%

Respecto el reparto del presupuesto por miembros del consorcio, el reparto es el siguiente:

Tabla 8.2: Costes del proyecto GDO2Clim por miembros del consorcio

Partida	2014	2015	2016	2017	Total	%
ENERTIKA	33.830	44.641	53.043	61.417	192.931	31%
WATTABIT	22.642	54.617	84.700	27.773	189.732	30%
MCIA	15.546	61.727	64.927	21.455	163.655	26%
CTM	26.467	26.605	17.054	10.816	80.942	13%
Total	98.486	187.591	219.724	121.460	627.261	100%

El presupuesto total subvencionado del proyecto es de **174.233,27 €** a repartir entre los 4 miembros del consorcio (CTM, MCIA, ENERTIKA y WATTABIT). La distribución del presupuesto subvencionado por años es la siguiente:

- Año **2014**: 30.262,88 €
- Año **2015**: 54.730,80 €
- Año **2016**: 64.026,68 €
- Año **2017**: 25.212,91 €

Respecto al presupuesto del coste de gestión del proyecto y de las tareas de realización del presente TFM, se estima en 1.950 horas.

9. Impacto sobre el entorno

Este proyecto contribuye positivamente a una mejora en la reducción de las emisiones de CO₂ gracias a la optimización de la operación de las máquinas de clima y la consecuente reducción de consumo energético. Tal como se ha expuesto en el capítulo 2 - *Análisis de mercado y estado del arte*, los edificios terciarios corresponden a uno de los grandes consumidores de energía, principalmente debido al uso de los sistemas de climatización. De este modo, el planteamiento y desarrollo del proyecto incide específicamente en uno de los sectores con mayor intensidad energética.

Tras analizar las tareas de operación y mantenimiento en esos edificios, se ha observado que dentro de las tareas diarias del personal de mantenimiento, parte de su jornada se dedica a realizar pequeños ajustes en la operación de los sistemas de clima. Además, en muchos casos, los fallos en máquinas no son detectados a tiempo, lo que conlleva una reducción del confort en los edificios durante las horas en las que no se solventa la avería. Gracias a la automatización de los sistemas de clima y su monitorización continua se proporciona una mejora en las tareas de operación y mantenimiento de las mismas, generando mejoras en el confort a los usuarios de las plantas piloto.

Desde el punto de vista del personal de mantenimiento, el proyecto contribuye a una mayor eficiencia en las tareas a realizar durante su jornada, puesto que ciertas tareas de control rutinario son centralizadas en la plataforma y disponen de más tiempo para dedicarlo a otros temas. Asimismo, destacar que los equipos instalados y la tecnología desarrollada ha quedado de forma permanente en las plantas piloto y que los principales beneficiarios serán los usuarios y personal de mantenimiento de los edificios. Al ser edificios públicos, se puede considerar que son avances que se ponen al servicio de la comunidad. Desde el punto de vista interno del proyecto, se anima a académicos y entidades a que visiten las plantas pilotos y las tecnologías instaladas en caso de tener interés.

La investigación realizada en el campo de la inteligencia artificial para la modelización de comportamiento de máquinas de clima y la disponibilidad de dicha información como fuente de información pública facilita la investigación futura en este ámbito. Si bien de forma teórica se dispone de gran literatura referente a los modelos de inteligencia artificial, durante el planteamiento del proyecto se observó que en el campo de la optimización energética la cantidad de información no era extensa. Gracias a los avances alcanzados en este proyecto en términos de aplicación de los algoritmos al sector energéticos, se facilita la investigación y diseño de productos y servicios basados en esta tecnología a académicos y empresas que deseen focalizarse en este ámbito.

Cabe destacar que gracias a este proyecto se ha conseguido investigar en el desarrollo de modelos basados en algoritmos de inteligencia artificial y se ha podido obtener subvención y financiación para estas tareas, por parte del Ministerio de Economía, Industria y Competitividad. La duración del proyecto ha sido de 3 años, durante los cuales ha sido necesaria la contratación de personal especializado para el desarrollo de la tecnología planteada. Este proyecto ha contribuido a la generación de empleo tanto en empresas privadas de mediano y pequeño tamaños (ENERTIKA y WATTABIT) como en centros de investigación públicos vinculados con la universidad (CTM, MCIA).

Estas iniciativas contribuyen con gran impacto a que el tejido empresarial y universitario del país se beneficie de los avances tecnológicos desarrollados de forma interna. Asimismo, la publicación de la documentación (entregables, ficheros de código, etc...) en la base de datos de RETOS COLABORACIÓN 2014 propicia una continuidad de los desarrollos realizados. Por último, es importante destacar la retención de talento en empresas y equipos de investigación que brinda la ejecución de un proyecto de I+D como este, en el que se han podido financiar unos trabajos de gestión y desarrollo de una tecnología que ahora puede ser usada por la comunidad.

10. Conclusiones

Los resultados obtenidos por el proyecto son satisfactorios, ya que se han cubierto los objetivos generales fijados en su planteamiento. Las tareas de gestión de proyecto para garantizar la correcta ejecución de las tareas por todos los miembros del consorcio, de una forma coordinada y en los plazos marcados, se han realizado con éxito.

Durante la ejecución del proyecto se han identificado aspectos de mejora que no se tuvieron en cuenta durante el planteamiento. La documentación de estos puntos ha sido de gran utilidad para las empresas del consorcio, ya que ha ayudado de forma directa a la mejora del planteamiento de nuevos proyecto de I+D relacionados con la gestión del clima.

A modo resumen, los principales aspectos de mejora identificados son:

- Se ha subestimado el número de recursos necesarios al modelado de la envolvente del edificio
- La caracterización puede suponer una barrera en el momento de replicar los modelos a nuevas máquinas de clima
- La cantidad de sensores a instalar en un edificio puede suponer una barrera en la ejecución del proyecto debido al incremento del CAPEX del proyecto.
- El módulo de vida útil remanente no ha sido posible validarlo con datos reales, dado que no se ha dispuesto de tiempo suficiente para detectar degradaciones en el rendimiento de las máquinas.

A nivel de producto y lanzamiento comercial, es necesario trabajar en una reducción de los costes de sensorización iniciales del proyecto. Este producto tiene muchas posibilidades en aquellos edificios que ya disponen de sensores desplegados en máquinas de clima y consumos energéticos. Cabe destacar que para una garantizar una correcta optimización del clima, se deben modelar ciertos aspectos de comportamiento del edificio, con lo cual, primeramente se debe realizar un estudio de la envolvente del mismo. Esto también puede suponer una barrera en la venta del producto.

Se concluye que, si bien el proyecto ha sido satisfactorio en términos de investigación del comportamiento de las máquinas de clima y en el desarrollo de algoritmos de optimización de uso, se requieren adaptaciones del código para que se ajuste a los requerimientos y necesidades de otros edificios. De modo que de cara un desarrollo masivo a nivel de producto, se aconseja trabajar en modelados de edificios que requieran un tiempo de caracterización bajo y, por ende, más económicos a nivel de implementación.

11. Agradecimientos

Quisiera agradecer el esfuerzo y las horas compartidas durante la gestión y ejecución del proyecto a todos los miembros del consorcio de GDO2Clim. En primer lugar, a las entidades y empresas que lo forman (MCIA, CTM, ENERTIKA y WATTABIT) y personalmente a los líderes de los paquetes de trabajo de los distintos entregables: Luís Romeral, Konstantinos Kampouropoulos, Enric Sala, Àngel Verdú, Carlos Sánchez y Ceferino Ruz.

Asimismo, agradecer al programa RETOS-COLABORACIÓN 2014, impulsado por el Ministerio de Economía, Industria y Competitividad por el apoyo económico para la ejecución del proyecto.

Especial agradecimiento al profesor PhD. Roberto Villafáfila por dirigir y supervisar mi trabajo en este TFM. Gracias por tu comprensión, adaptabilidad de horarios y por todo el apoyo durante la ejecución de este proyecto. Y gracias por los cafés en la cafetería de la ETSEIB!

Gracias al equipo de WATTABIT por el esfuerzo realizado en la ejecución de las tareas y por todo el apoyo recibido para que el proyecto saliera adelante.

Y por último pero no menos importante, gracias a toda mi familia por el apoyo recibido durante los años del máster. Gracias Henard por ayudarme con la logística durante estos últimos meses, sin ti hubiera sido imposible compaginar el trabajo con la ejecución de este proyecto (como mínimo, seguro que me hubiera quedado sin cenar más de un día...).

12. Bibliografía

- [1] «BP Statistical Review of World Energy June 2017, Bob Dudley Group chief executive».
- [2] REE - Estadísticas sistema eléctrico, «<http://www.ree.es/es/estadisticas-del-sistema-electrico/3015/all>».
- [3] REE - Estadísticas nacionales, «<http://www.ree.es/es/estadisticas-del-sistema-electrico-espanol/series-estadisticas/series-estadisticas-nacionales>».
- [4] MINETAD - IDAE, «<http://www.minetad.gob.es/energia/balances/Balances/LibrosEnergia/energia-espana-2016.pdf>».
- [5] Plan de Ahorro y Eficiencia Energética de los edificios de la Administración General del Estado (PAEE-AGE), aprobado por Consejo de Ministros el 20 de julio de 2007, «http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_11905_PAEE_2011_2020._A2011_A_a1e6383b».
- [6] Plan de aplicación al Ministerio de Fomento y a todas sus entidades dependientes, que recoge el conjunto de estrategias y actuaciones orientadas a conseguir la reducción del consumo energético y del impacto medioambiental de los sectores del transporte, «<http://www.fomento.gob.es/NR/rdonlyres/3A6E2F43-5449-45ED-B6DC-3C39E9E6AA30/101081/11040601P3PlanAhorroenerg%C3%A9tico.pdf>».
- [7] FENERCOM, «<https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/Sistemas-eficientes-de-climatizacion-y-uso-de-energias-renovables-fenercom-2011.pdf>».
- [8] Eficiencia Energética en sistemas de refrigeración, Klaus Peter Schmid, INRA Refrigeración y Luis Hinojosa de Fundación Chile, «http://www.frioycalor.cl/revistas/rev_92.pdf».
- [9] Smarkia - Blog de noticias, «<http://www.smarkia.com/es/blog/scada-bms-o-sge-que-tecnologia-necesito-en-mi-edificio>».
- [10] BOE-A-2016-1460, «<https://www.boe.es/boe/dias/2016/02/13/pdfs/BOE-A-2016-1460.pdf>».
- [11] ESEficiencia, «<https://www.eseficiencia.es/2017/07/11/sistemas-gestion-energetica-opcion-empresas-cumplan-rd-562016>».
- [12] GDO2Clim, Retos-Colaboración 2014; CTM, MCIA, ENERTIKA, WATTABIT, «E2.1 - Marco de actuación del proyecto, especificaciones técnicas,» PT2, 2017.
- [13] Bibian Alonso Hoyos, Marta Cecilia Mejía, «Fundamentos de termodinámica clásica para ingeniería,» Editorial Universidad Nacional De Colombia Sede Medellín [ISBN: 978-958-728020-3], Colombia, 2009.
- [14] Dr. F. Mahjouri, «Vacuum Tube Liquid-Vapor (Heat-Pipe) Collectors,» Thermo Technologies, 5560 Sterrett Place, Suite 115 Columbia, Maryland 21044 .
- [15] Vignesh Gowrishankar Christina Angelides Hannah Druckenmiller, «Combined Heat and Power Systems: Improving the Energy Efficiency of Our Manufacturing Plants, Buildings, and Other Facilities,» NRDC Issue paper,, Abril 2013.
- [16] GDO2Clim, Retos-Colaboración 2014; CTM, MCIA, ENERTIKA, WATTABIT, «E3.1 - Base de datos tecnológica para los equipos e instalaciones de climatización.,» PT3, 2017.
- [17] GDO2Clim, Retos-Colaboración 2014; CTM, MCIA, ENERTIKA, WATTABIT, «E4.1 - modelos dinámicos para el sistema energético consumidor, a partir de datos históricos y "energy drivers",» PT4, 2017.
- [18] GDO2Clim, Retos-Colaboración 2014; CTM, MCIA, ENERTIKA, WATTABIT, «E6.2 - Algoritmos de estimación de vida remanente,» PT6, 2017.
- [19] GDO2Clim, Retos-Colaboración 2014; CTM, MCIA, ENERTIKA, WATTABIT, «E8.1 - Validación de las aplicaciones software de optimización curva de demanda y de mantenimiento y vida remanente,» PT8, 2017.
- [20] GDO2Clim, Retos-Colaboración 2014; CTM, MCIA, ENERTIKA, WATTABIT, E4.2 - Modelos dinámicos para el sistema energético consumidor, a partir de información tecnológica, PT4, 2017.

Anexo A: Datos monitorizados en planta piloto

La información contenida en este Anexo se ha extraído del entregable E3.1 del proyecto GDO2Clim. Presenta un ejemplo del histórico de datos adquiridos por los sistemas de medida y monitorización [16] [17].

A continuación se muestran algunos periodos de monitorización de todas las variables registradas por el sistema de adquisición.

- Sistema de Producción de calor y frío
 - Caldera de Condensación
 - Enfriadora
 - Solar térmica (tubos de vacío)
- Sistema de distribución
 - Anillo de distribución de frío
 - Anillo de distribución de calor
- Unidades terminales y unidades de tratamiento de aires
 - Fancoils
 - Unidades de tratamiento de aire (UTA)

1. Sistema de Producción de calor y frío

a. Caldera de Condensación

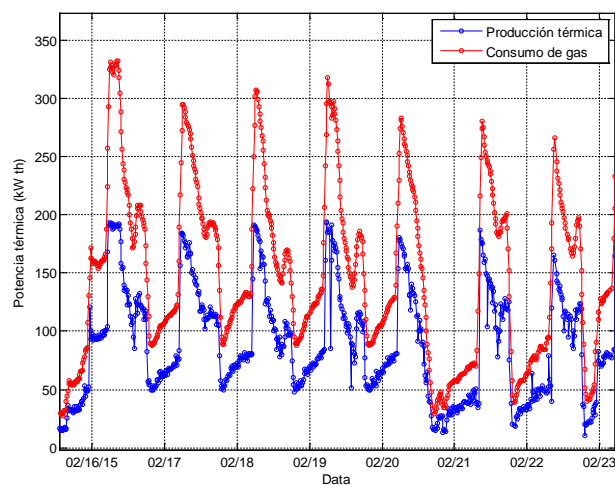


Figura 0.1: Consumo y producción de energía instantánea de la caldera de condensación

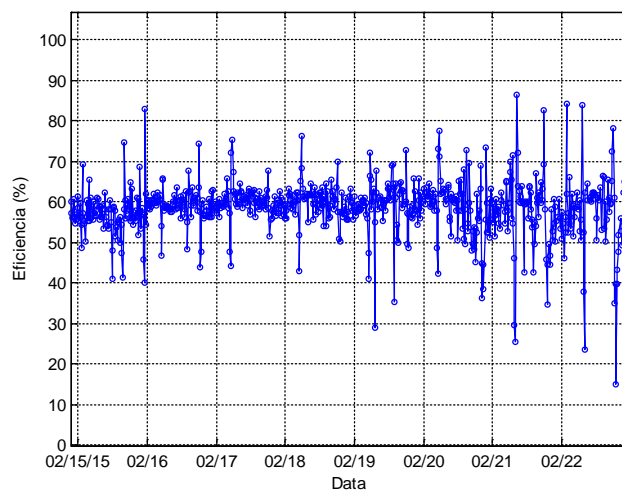
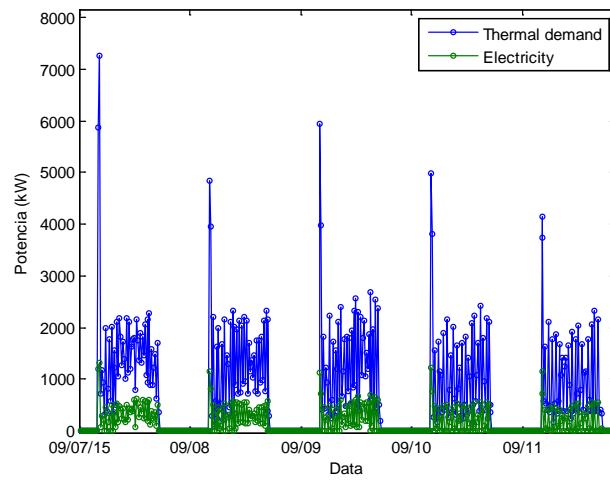
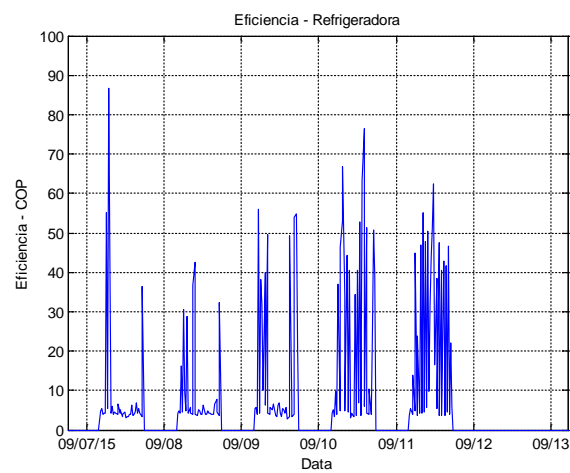


Figura 0.2: Eficiencia instantánea de operación de la caldera de condensación

b. Enfriadora

*Figura 0.3: Consumo y producción de energía instantánea de la refrigeradora**Figura 0.4: Eficiencia instantánea de operación de la refrigeradora*

c. Solar térmica (tubos de vacío)

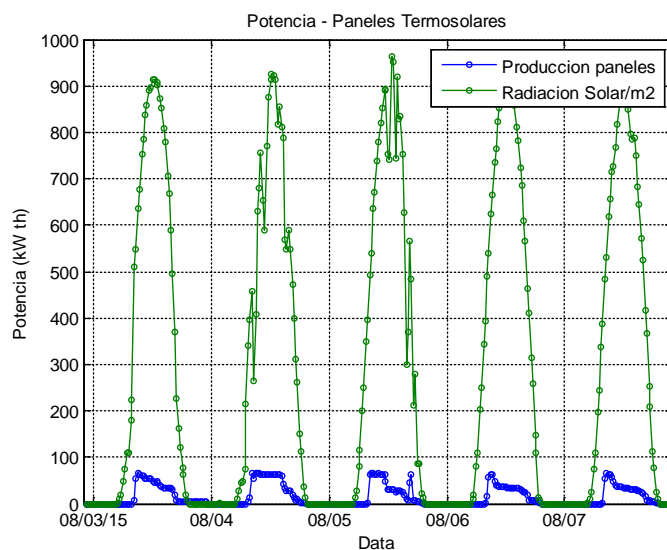


Figura 0.5: Radiación incidente y potencia térmica entregada por los paneles solares térmicos

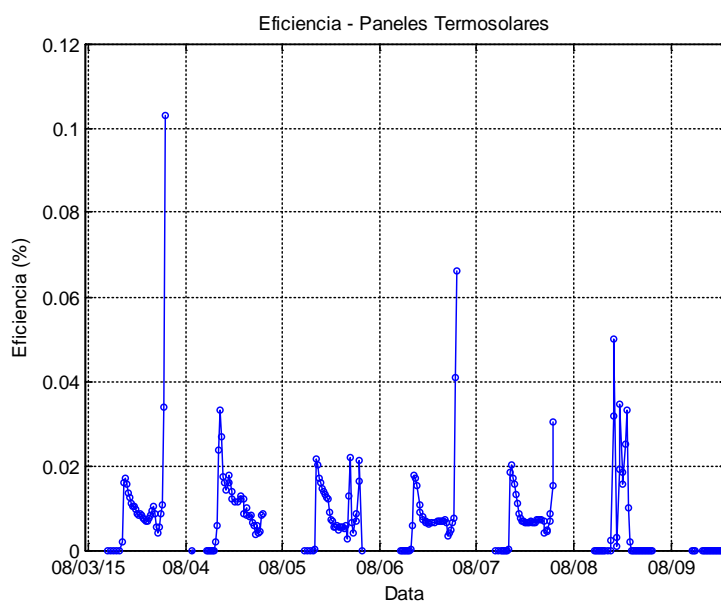


Figura 0.6: Eficiencia instantánea de los paneles solares térmicos

2. Sistema de distribución

a. Anillo de distribución de frío

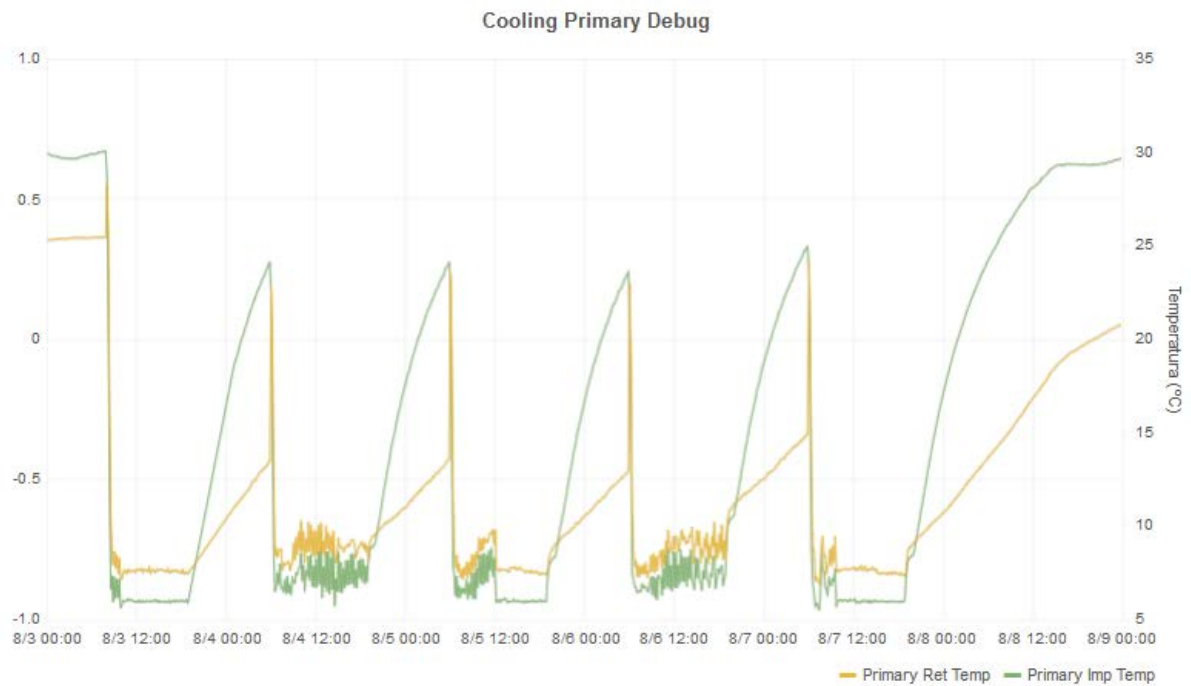


Figura 0.7: Temperaturas de impulsión y retorno del colector primario de generación de frío

b. Anillo de distribución de calor



Figura 0.8: Temperaturas de impulsión y retorno del colector de generación de calor

c. Anillo de distribución de ACS

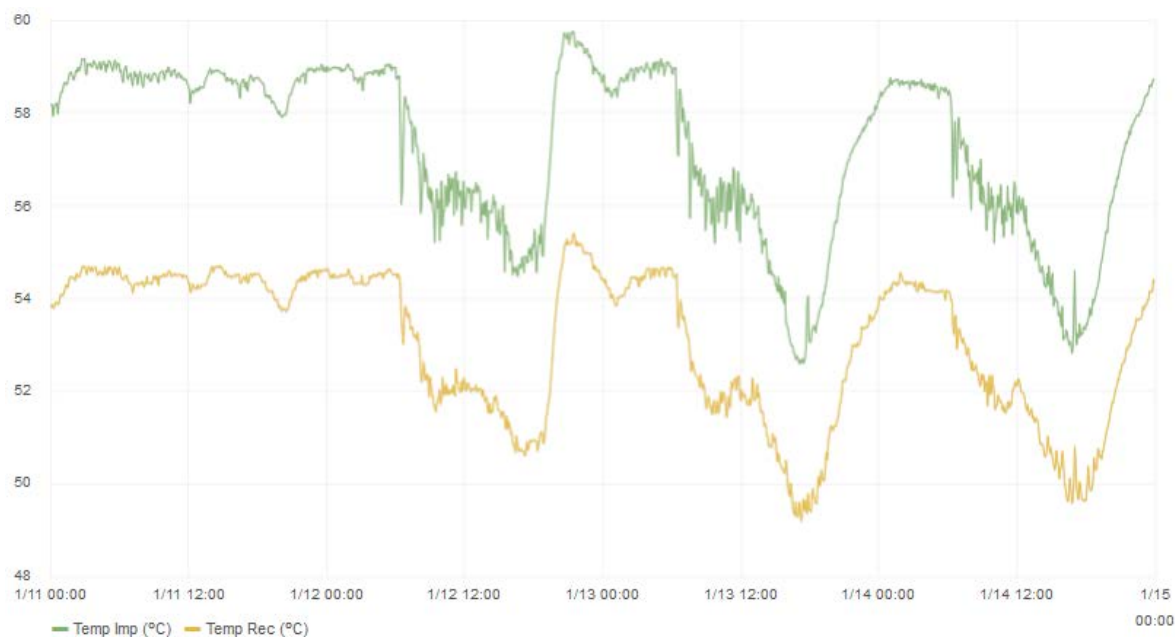


Figura 0.9: Temperaturas de impulsión y retorno del circuito de ACS

3. Unidades terminales y unidades de tratamiento de aires

a. Anillo de distribución para Fancoils en las habitaciones del edificio

Calor

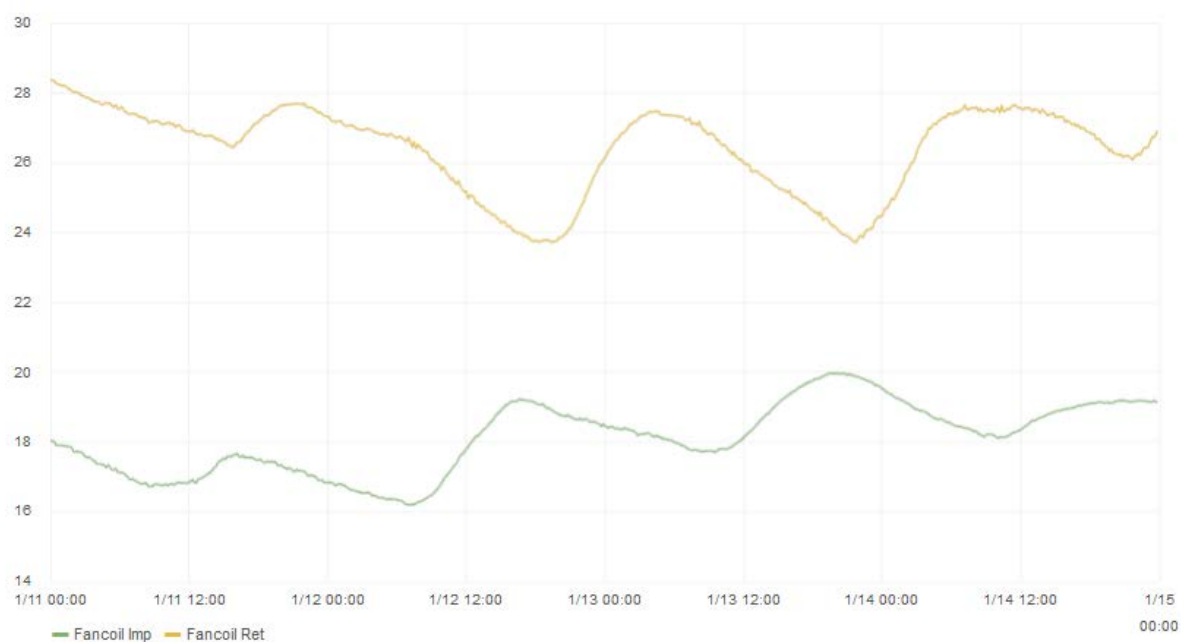


Figura 0.10: Temperaturas de impulsión y retorno del circuito de calefacción por fancoils

Frío

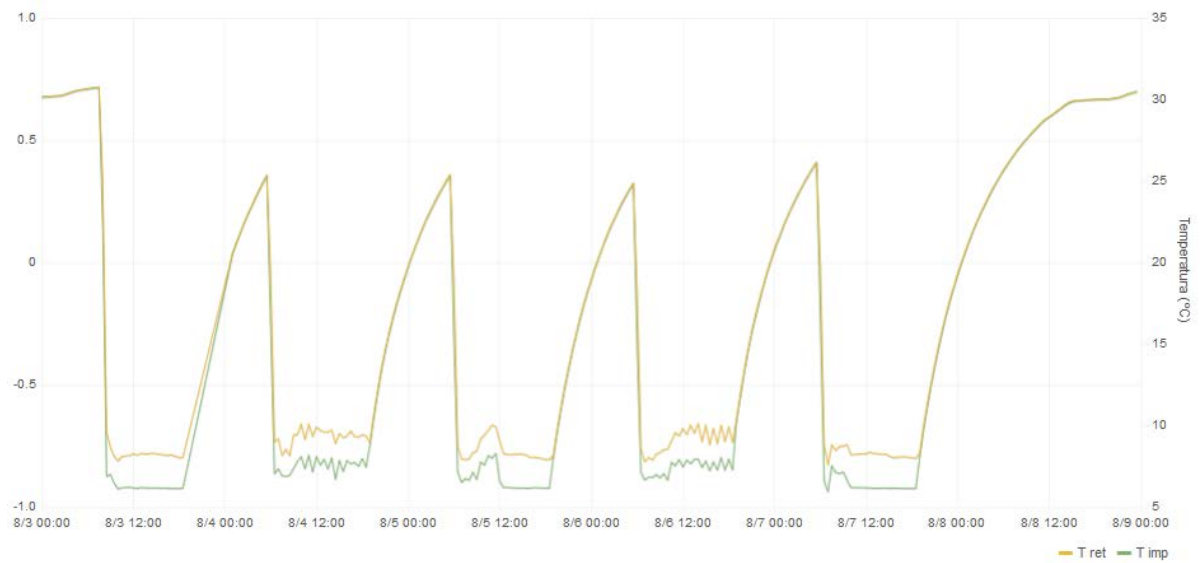


Figura 0.11: Temperaturas de impulsión y retorno del circuito de refrigeración por fancoils

b. Distribución térmica para Unidades de Tratamiento de Aire (UTA)

Calor



Figura 0.12: Temperaturas de impulsión y retorno de calor para las UTAs

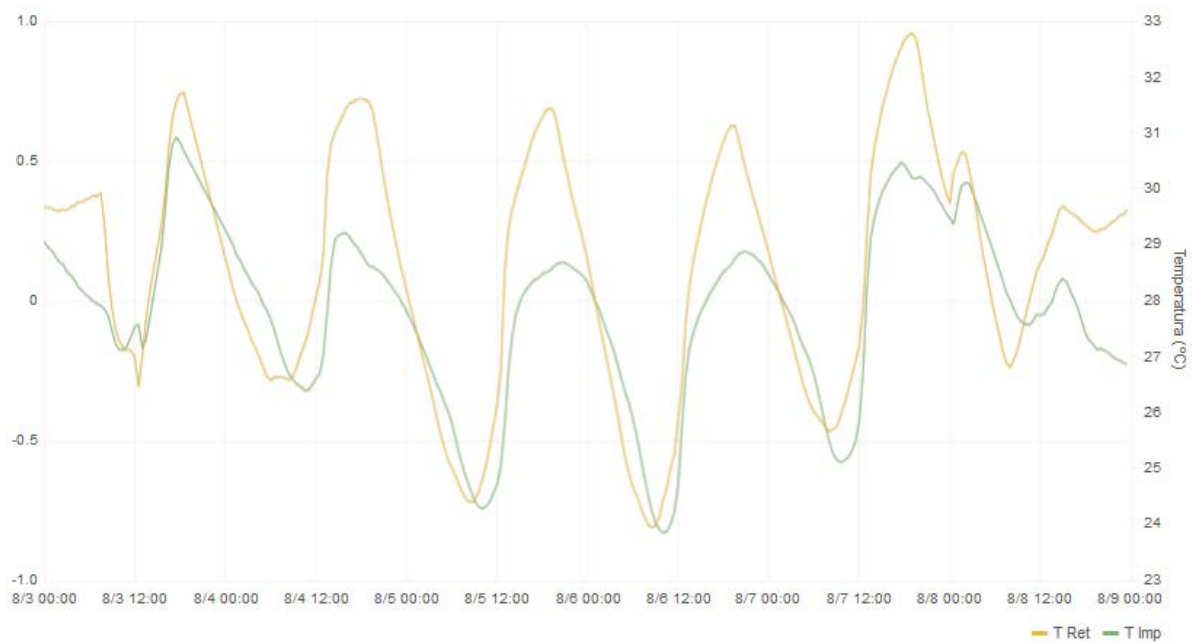
Frío

Figura 0.13: Temperaturas de impulsión y retorno de refrigeración para las UTAs

Anexo B: Tratamiento y estandarización de datos

El presente Anexo detalla las tareas realizadas para el tratamiento y estandarización de los datos obtenidos por los sensores y dataloggers. Garantizar la calidad de los datos es crucial para una correcta ejecución de los modelos.

La información contenida en este anexo se ha extraído íntegramente del Paquete de Trabajo PT4 - Modelado automático de consumos, del documento E4.1 - Modelos dinámicos para el sistema energético consumidor, a partir de datos históricos y “energy drivers” [17].

B.1 Rellenado de huecos

Este problema consiste en la aparición de huecos en las señales adquiridas, lo que dificulta su procesamiento por los módulos de inteligencia. Estos problemas causan una degradación sustancial de la calidad de los resultados y dependiendo de su cantidad y duración en el tiempo, pueden causar errores de ejecución que impidan completamente su funcionamiento.

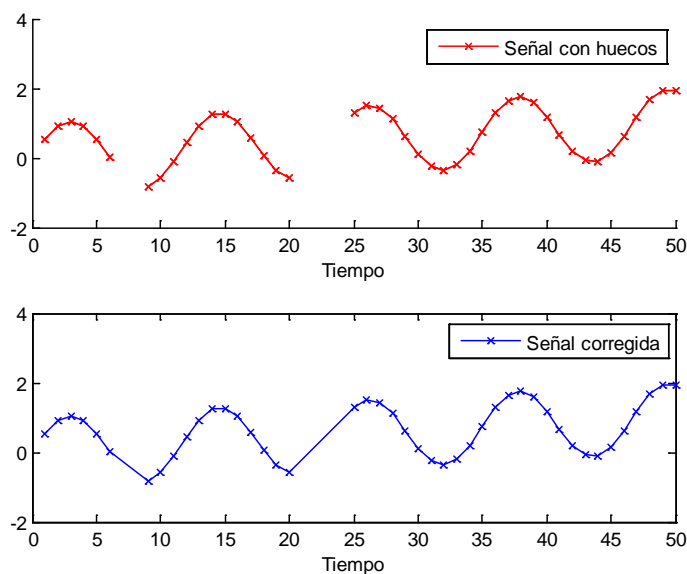


Figura B.1: Rellenado de huecos en una señal.

Las posibles causas de estos problemas son fallos en las comunicaciones, tanto de comunicación de red de campo como de transmisión a la plataforma, así como cortes en el suministro eléctrico que causen una interrupción en la adquisición de datos.

La solución adoptada para solventar este problema es la interpolación lineal de los puntos en los huecos detectados en la señal. Aun así, esta solución solo resulta aplicable en huecos de corta duración. Según las experiencias encontradas, se ha determinado que en la práctica

esta solución da buenos resultados con huecos de hasta 4 horas, porque más allá puede generar inconsistencias en la señal y causar problemas adicionales.

En caso de existir huecos de mayor duración temporal, estos serán ignorados, asumiendo que ese intervalo de la señal es desconocido y por consiguiente no se tendrá en cuenta en el análisis realizado por los módulos de inteligencia.

B.2 Eliminación del ruido

Este problema consiste en la inclusión de componentes en la señal que no forman parte de ella y no aportan información. En función de la magnitud de la afectación por el ruido, el funcionamiento del procesado realizado por los módulos de inteligencia puede verse degradado, especialmente la precisión del modelado y predicción, lo que afecta directamente al resto del sistema.

La causa más habitual de este problema son los acoples de otras señales causados por un incorrecto aislamiento en los sensores en la etapa de adquisición en los equipos de medida.

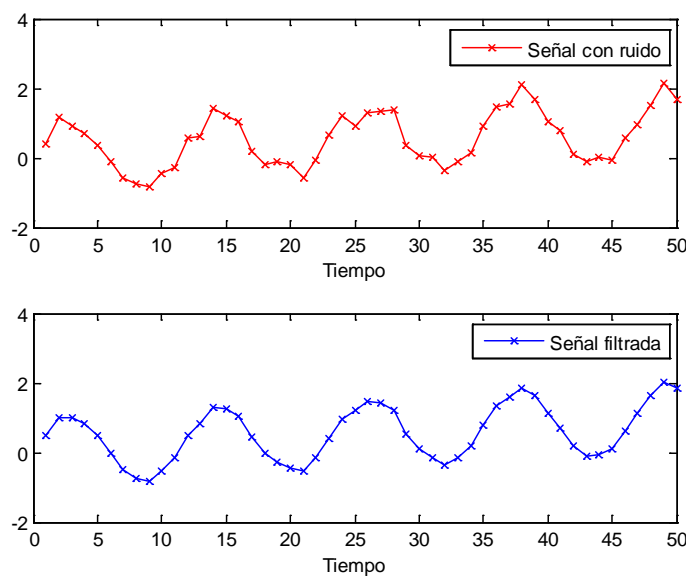


Figura B.2: Eliminación del ruido en una señal.

La solución adoptada para solventar este problema es la incorporación de un filtro de altas frecuencias que elimine las componentes aleatorias en la señal y la suavice, como se puede ver en la figura anterior.

B.3 Eliminación de outliers

Es habitual durante la adquisición de señales la aparición del fenómeno conocido como outliers. Los outliers son valores atípicos que aparecen puntualmente en la señal y que no son coherentes con el resto de ella por realizar saltos de gran magnitud.

Este tipo de problema puede estar causado tanto por errores en la etapa de conversión analógica-digital que causan saturaciones en los bits de los datos adquiridos, como por errores en las comunicaciones de red de campo o de transmisión que causen alteraciones en los valores.

La solución adoptada para solventar este tipo de problemas es la implementación de un filtro de outliers basado en la desviación de las muestras individuales respecto al resto de la señal. Cuando los outliers sean detectados, estos serán procesados por el rellenado de huecos.

Este tipo de filtro es implementado habitualmente mediante una comparación de cada muestra con 3 veces la desviación estándar de la señal. El problema es que esta implementación sólo resulta eficaz en algunos casos, dependiendo de la topología de la señal. En el caso de la siguiente Figura, puede apreciarse que solo algunos outliers están siendo filtrados, mientras que otros no son detectados mediante esta estrategia.

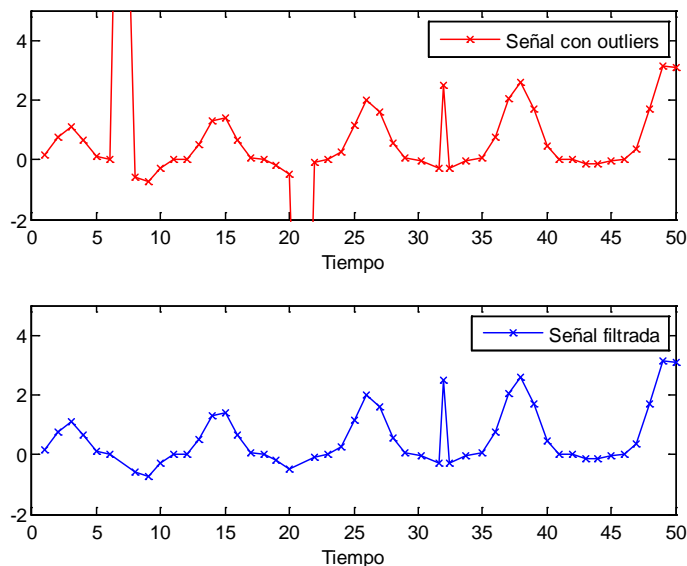


Figura B.3: Implementación de un filtro de outliers global.

Por este motivo, la implementación de este filtro de outliers se ha mejorado empleando una ventana móvil que analice las muestras en comparación con las N más próximas muestras en el eje temporal, en lugar de usar un procesado global. En este caso, se detectan y eliminan outliers locales que no podrían ser detectados por el filtro global.

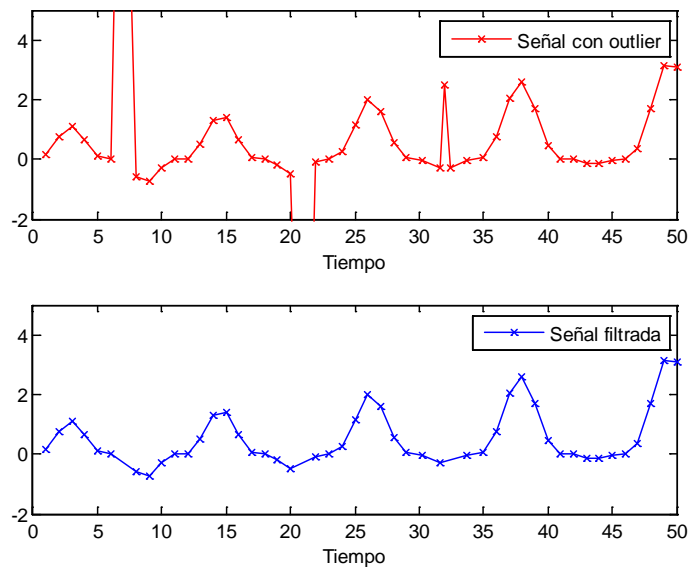


Figura B.4: Implementación mejorada de detección y eliminación de outliers.

B.4 Estandarización del periodo de adquisición

Este problema consiste en la adquisición de señales en la planta a diferentes frecuencias de muestreo. Para garantizar la correcta operación de los módulos de inteligencia, los periodos de muestreo deben estar estandarizados entre los diferentes datos adquiridos.

La causa de este problema es la utilización de diferentes equipos de medida, integrados en diferentes controladores de campo, los cuales pueden usar cada uno su propia frecuencia de muestreo.

La solución adoptada para solventar este problema es la interpolación de los puntos que no se conformen al estándar, como puede verse en la figura siguiente:

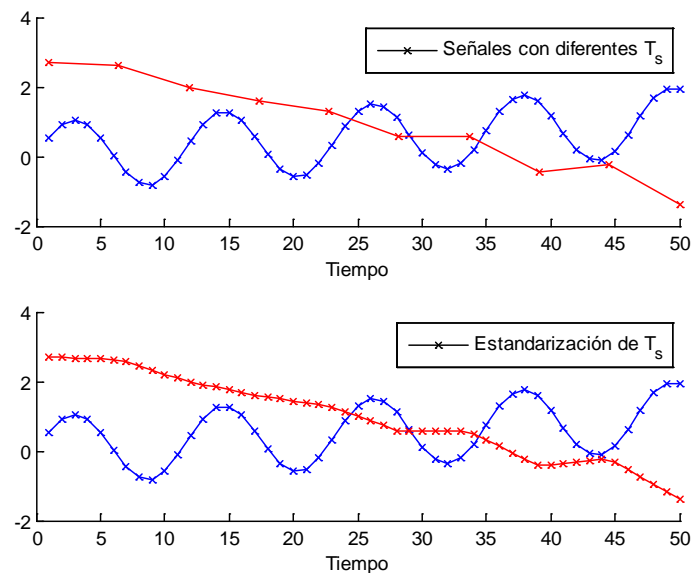


Figura B.5: Estandarización del periodo de adquisición de varias señales.

Anexo C: Resultados de la metodología de desarrollo de los modelos

Este Anexo se ha extraído íntegramente del paquete de trabajo PT4: Modelado automático de consumos, documento *E4.2 - Modelos dinámicos para el sistema energético consumidor, a partir de información tecnológica* [20].

C.1 Análisis tecnológico y de la información disponible

A continuación se presenta la relación de tecnologías objeto de estudio en el proyecto junto con los principios de operación de cada una y un análisis de la disponibilidad de información facilitadas por los fabricantes.

C.1.1 Calderas de combustión

Equipo de generación de energía térmica a partir del consumo de combustible (gas natural o biomasa). Estos equipos proporcionan un aumento en la temperatura a un corriente de agua que circula por su interior (energía térmica) a partir de la combustión de un combustible (energía química). Los principales fenómenos termofísicos que se dan lugar en esta tipología de equipos son la combustión y transferencia de calor entre fluidos (agua-agua o gases de combustión agua). Especialmente en calderas de gas natural, existen variantes de caleras de condensación que permiten el aprovechamiento del calor latente que se desprende de la condensación del agua de los gases de combustión, siempre que el flujo de agua de calefacción lo permita (agua de retorno entre 35-45°C).

A continuación se presenta un esquema del balance energético que se produce en este tipo de equipos.

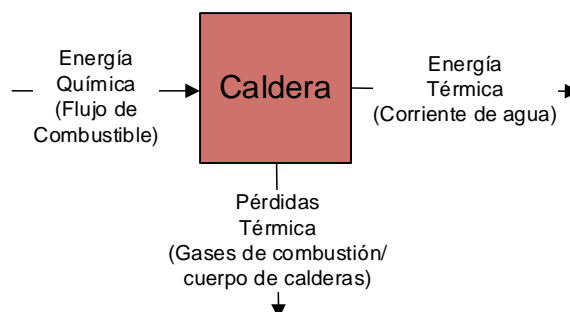


Figura C.1: Balance de energía de una caldera de combustible.

La información proporcionada por los fabricantes de esta tipología de equipos es escasa. Únicamente los fabricantes facilitan la potencia de máxima del equipos, como máximo en dos puntos de saltos de temperatura, el rendimiento en un salto térmico concreto

(principalmente según PCS), el caudal del circuito de ACS y calefacción necesario o proporcionado, en el caso de disponer de grupo de impulsión hidráulico propio. Algunos fabricantes están empezando a facilitar la capacidad de modulación a diversos saltos térmicos y la variación de eficiencia a cargas parciales.

C.1.2 Refrigeradora y bombas de calor

Se considera la tecnología de bomba de calor como tecnología base de generación de calor y frío. En el proyecto únicamente se consideraran bombas de calor y refrigeradoras basadas en ciclos e compresión de vapor y con aporte de energía eléctrica. Una bomba de calor consiste en un equipo que permite la transferencia de energía térmica entre una fuente de baja temperatura a una fuente de alta temperatura a partir de un consumo de energía eléctrica. Dependiendo de si el funcionamiento se basa en el aporte de energía térmica o en la extracción de esta del medio deseado (interior del edificio), la bomba de calor trabajará en modo calor o en modo frío. Las refrigeradoras son equipos, basados en el mismo principio de operación, que únicamente están preparados para su operación en modo frío.

Estos equipos utilizan un fluido de trabajo que mediante un ciclo termodinámico (compresión, expansión, evaporación y condensación) permite la transferencia de calor deseada. En modo calor este equipo aporta energía térmica al medio deseado (aire o corriente de agua interior) a partir del calor extraído del medio exterior (aire ambiente o corriente de agua exterior). En modo frío el equipo trabaja en modo inverso, extrayendo energía térmica del medio deseado y disipando en el medio exterior.

Esta tipología de equipos se suelen clasificar según los fluidos entre los que se trabaja. El presente proyecto, por acuerdo de consorcio, se centrará en las bombas de calor y refrigeradores Aire-Agua. Este tipo de equipos trabaja disipando y absorbiendo calor del aire exterior y suministrando energía o extrayéndola de una corriente de agua interior, que es la que se distribuye por el interior del edificio a las unidades terminales.

A continuación se presenta un esquema del balance energético que se produce en este tipo de equipos.

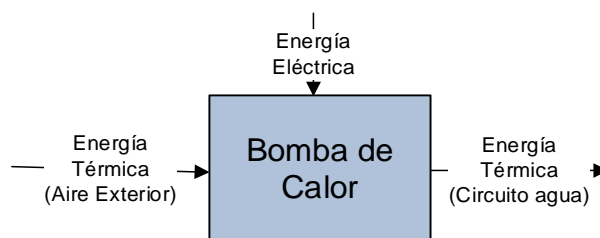


Figura C.2: Balance de energía en un sistema de bomba de calor o refrigeradora.

Los fabricantes de esta tipología de equipos principalmente proporcionan la información de la certificación EUROVENT, basada en la UNE-EN 14511 e UNE-EN 14825. Esta certificación, de referencia en Europa, proporciona una medida eficiencia, EER (modo refrigeración) y el COP (modo calefacción), capacidad y consumo del equipo para dos puntos de operación, uno en modo calor y uno en modo refrigeración. Este certificado también proporciona una media de la eficiencia estacional del equipo en modo refrigeración ESEER (European Seasonal, Energy Efficiency Ratio). Algunos fabricantes proporcionan la capacidad y eficiencia para diversos puntos de operación a plena carga, pero con variación de las condiciones exteriores de aire (temperatura y humedad) y de temperaturas de impulsión del circuito interior de agua.

C.1.3 Tecnología solar térmica

Equipos de generación de energía térmica a partir de la captación y conversión de la radiación solar en energía térmica. La energía térmica generada es cedida a una corriente de agua que circula por su interior. En este tipo de tecnologías se producen principalmente dos fenómenos de transferencia de calor uno por radiación con el sol y el cielo, y seguidamente de convección con el aire exterior y con el fluido de agua de distribución en el interior del equipo.

A continuación se presenta un esquema del balance energético que se produce en este tipo de equipos.

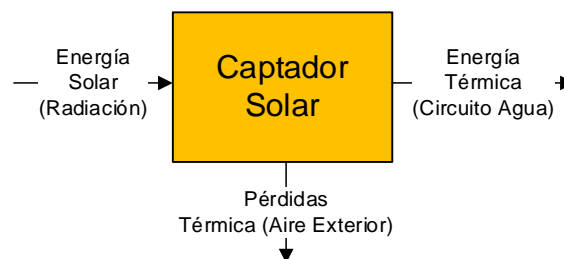


Figura C.3: Balance de energía en un captador solar.

Los fabricantes de este tipo de tecnología proporcionan la información obtenida de los ensayos de certificación mediante aplicación de la norma DIN EN 12975. Los fabricantes proporcionan curvas de rendimiento que permiten obtener la eficiencia de los captadores en función de la temperatura media del agua en el captador, la temperatura del aire exterior y la radiación total incidente en la superficie de útil de absorción.

C.1.4 Cogeneración

Equipo de generación simultánea de energía eléctrica y térmica a partir de la energía aportada por gas natural. Existen también variantes que pueden funcionar con gas propano. Este equipo se basa en un motor alternativo de combustión interna y un alternador para la generación de energía eléctrica. El equipo permite también la cesión de energía térmica, procedente de la refrigeración del motor y de

los gases de escape, a una corriente de agua circulante por su interior. Según la operación observada por el consorcio, se decidió considerar que el modo de funcionamiento típico de la cogeneración es el funcionamiento a plena producción eléctrica y variación de entrega de la potencia térmica según la variación de temperaturas de retorno.

A continuación se presenta un esquema del balance energético que se produce en este tipo de equipos.

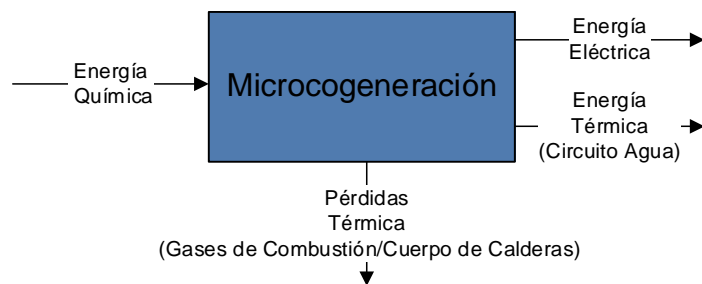


Figura C.4: Balance de energía en un captador solar.

La información proporcionada por los fabricantes es escasa. Solamente se proporciona de la potencia de generación eléctrica y térmica máxima, eficiencia máxima y temperaturas de impulsión y retorno del agua en único punto de operación.

A partir de la información recopilada y del análisis de los fenómenos físicos. A continuación se muestra un resumen de los parámetros y variables relevantes para el modelizado de los equipos, junto con la selección de parámetros proporcionados por los fabricantes para su incorporación en el modelo.

Tabla C.1: Tabla resumen del análisis tecnológico realizado a los equipos de producción de frío y calor seleccionados y las variables a monitorizar.

Tecnología	Variable Independientes	Unidades	Parámetros procedentes de la información tecnológica	Unidades
Calderas de combustible Fluido -Condensación -Baja temperatura -Combustible sólido	Temperatura aire exterior	°C	Eficiencia de referencia (Salto de temperatura más próximo al rango de trabajo real)	%
	Temperatura de Retorno	°C	Máxima producción	kW
	Temperatura de Impulsión	°C	Mínima producción	kW
	Consumo Combustible	kWh o kJ	Rango de modulación / Potencia entregada a mínima carga (para diferentes saltos de temperatura)	% o kW
	Carga Parcial	%		
	Producción Térmica	kWh o kJ		
Bomba de calor t Refrigeradora por compresión de vapor	Temperatura aire exterior	°C	Eficiencia de referencia en modo frío (Circuito agua interior 12/7°C, temperatura exterior seca 35°C)	%
	Humedad del aire exterior	% o kg/m3	Eficiencia de referencia en modo frío (Circuito agua interior 40/45°C, temperatura exterior húmeda 6°C)	%
	Temperatura de Retorno	°C	Capacidad de producción de referencia modo frío (Circuito agua interior 12/7°C, temperatura exterior seca 35°C)	kW
	Temperatura de Impulsión	°C	Capacidad de producción de referencia modo calor (Circuito agua interior 40/45°C, temperatura exterior húmeda 6°C)	kW
	Consumo Eléctrico	kWh o kJ		
	Carga Parcial	%		
	Producción Térmica	kWh /kJ		
Solar térmica -Paneles solares planos -Paneles con tubos de vacío	Temperatura aire exterior	°C	Rendimiento óptico	%
	Humedad del aire exterior	% o kg/m3	Coeficiente de perdidas proporcional	W/m².°C
	Temperatura de Retorno	°C	Coeficiente de perdidas cuadrático	W/m².(°C)²
	Temperatura de Impulsión	°C	Superficie útil de absorción	m²
	Radiación Incidente	W/m²		
	Producción Térmica	kWh o kJ		
Cogeneración	Temperatura aire exterior	°C	Potencia eléctrica máxima	kW
	Temperatura de Retorno	°C	Potencia térmica máxima	kW
	Temperatura de Impulsión	°C	Eficiencia eléctrica máxima	%
	Consumo Combustible	kWh o kJ	Eficiencia térmica (Salto de temperatura más próximo al rango de trabajo real)	%
	Carga Parcial	%		
	Producción Térmica	kWh o kJ		

C.2 Formulación de modelos

A partir de la identificación de las variables independientes del modelo y de los parámetros tecnológicos proporcionados por el fabricante, a continuación se presentan los modelos por tecnología planteados.

Los modelos propuestos, plantean una interacción entre variable y unos coeficientes definidos según estudios anteriores, la bibliografía consultada y los fenómenos termofísicos que se dan lugar en los equipos y sistemas analizados.

C.2.1 Calderas de combustión

El modelo matemático utilizado modeliza la eficiencia de la caldera en función de la carga parcial de trabajo y de las temperaturas de impulsión y retorno. A continuación se presenta el modelo planteado.

$$\eta_c = \frac{P_t}{P_{comb}}$$

$$\eta_c = \eta_{c_{ref}} \cdot I_{ecp} \cdot I_{eT}$$

$$I_{ecp} = \frac{\eta_c}{\eta_{c_{ref}}} = a_0 + a_1 c_p + a_2 c_p^2$$

$$I_{eT} = \frac{\eta_c}{\eta_{c_{ref}}} = a_0 + a_1 T_m + a_2 T_m^2$$

$$c_p = \frac{P_t}{P_m}$$

$$P_m = P_{nom} \cdot I_{pT}$$

$$I_{pT} = \frac{P_m}{P_{nom}} = b_0 + b_1 T_m + b_2 T_m^2$$

$$T_m = \frac{(T_{im} + T_{re})}{2}$$

η_c [%]: Eficiencia del equipo, respecto al PCI del combustible.

$\eta_{c_{ref}}$ [%]: Eficiencia del equipo de referencia, respecto al PCI del combustible. Condiciones de impulsión a 80°C, retorno a 30°C y a plena carga.

P_t [kW]: Potencia térmica aportada al flujo de agua que recorrer el interior del equipo.

P_{comb} [kW]: Potencia aportada por el flujo de combustible.

I_{ecp} : Índice de carga parcial

I_{eT} : Índice de temperatura

c_p : Carga parcial del equipo. Porcentaje entre la potencia térmica entregada respecto a la potencia máxima proporcionada.

P_m [kW]: Potencia térmica máxima aportada por el equipo a las condiciones de uso.

P_{nom} [kW]: Potencia máxima a las condiciones de impulsión de 80°C y retorno a 30°C.

I_{pT} : Índice de temperatura media de variación de la potencia máxima en función de la temperatura media en el intercambiador.

T_m : Temperatura media en el intercambiador.

a_0, a_1, \dots : Coeficientes de correlaciones.

C.2.2 Refrigeradora y bombas de calor

El modelo matemático para expresar la eficiencia del equipo se expresa según la temperatura húmeda exterior y la eficiencia a la temperatura húmeda de referencia. A continuación se presentan las expresiones según la operación del equipo.

Modo Frío (Bombas de calor y Refrigeradoras)

$$EER = \frac{P_t}{P_e}$$

$$EER = EER_0 \times I_T$$

EER : Eficiencia del equipo en modo frío.

P_t [kW]: Potencia térmica aportada al flujo de agua que recorrer el interior del equipo.

P_e [kW]: Potencia eléctrica consumida por el equipo.

EER_0 : Eficiencia a la temperatura seca exterior de referencia.

Las condiciones de referencia son: Temperatura seca exterior 35°C. Circuito de agua de refrigeración con un salto entre 12°C y 7°C.

I_T : Índice modificador de la eficiencia según la temperatura exterior.

x [°C]: Temperatura húmeda exterior.

a_0, a_1 : Coeficientes de la correlación utilizada.

$$I_T = a_0 + a_1 x$$

Modo Calor (Bombas de calor)

$$COP = \frac{P_t}{P_e}$$

$$COP = COP_0 \times I_T$$

$$I_T = a_0 + a_1 x$$

COP: Eficiencia del equipo en modo frío.

P_t [kW]: Potencia térmica absorbida del flujo de agua que recorrer el interior del equipo.

COP_{t0} : Eficiencia a la temperatura húmeda exterior de referencia.

Las condiciones de referencia son: Temperatura seca húmeda 7°C. Circuito de agua de calefacción con un salto entre 12°C y 7°C.

I_T : Índice modificador de la eficiencia según la temperatura exterior.

x [°C]: Temperatura húmeda exterior.

a_0, a_1 : Coeficientes de la correlación utilizada.

C.2.3 Tecnología solar térmica

Eficiencia del captador depende de las temperaturas del fluido caloportador que circula por su interior y de la radiación total incidente.

$$\eta_s = \frac{P_t}{IT}$$

$$\eta_s = a_0 - a_1 \times \frac{(T_m - T_{out})}{IT} - a_2 \times \frac{(T_m - T_{out})^2}{IT}$$

η_c : Eficiencia del equipo.

P_t [kW]: Potencia térmica aportada al flujo de agua que recorrer el interior del equipo.

T_m [°C]: Temperatura media del circuito de agua interior.

T_{out} [°C]: Temperatura del aire exterior.

IT [W/m²]: Irradiación total incidente en el panel superficie inclinada.

C.2.4 Cogeneración

Los sistemas de cogeneración presentan una producción doble, electricidad y calor. Ambas producciones están ligadas la una de la otra. Según las consideraciones introducidas por el consorcio, la eficiencia eléctrica del sistema de cogeneración se considerará un valor constante. La eficiencia térmica del sistema se considerará variable según la carga parcial del sistema.

Potencia eléctrica

$$\eta_e = \eta_{e_{ref}}$$

P_t [kW]: Potencia eléctrica generada.

η : Eficiencia eléctrico del equipo, respecto al PCI del gas natural. Eficiencia indicada por el fabricante a las condiciones de test.

P_g [kW]: Potencia térmica proporcionada por el caudal de gas entrante. (Calculada a partir del PCI).

Potencia térmica

$$\eta_c = \frac{P_t}{P_{comb}}$$

$$\eta_c = \eta_{c_{ref}} \cdot I_{ecp}$$

η_c [%]: Eficiencia del equipo, respecto al PCI del combustible.

$\eta_{c_{ref}}$ [%]: Eficiencia del equipo de referencia, respecto al PCI del combustible. Condiciones de impulsión indicadas por el fabricante.

P_t [kW]: Potencia térmica aportada al flujo de agua que recorrer el interior del equipo.

$$I_{ecp} = \frac{\eta c}{\eta c_{ref}} = a_0 + a_1 c_p + a_2 c_p^2$$

$$c_p = \frac{P_t}{P_m}$$

P_{comb} [kW]: Potencia aportada por el flujo de combustible.

I_{ecp} : Índice de carga parcial

C_p = Carga parcial del equipo. Porcentaje entre la potencia térmica entregada respecto la potencia máxima proporcionada.

P_m [kW]: Potencia térmica máxima aportada por el equipo a las condiciones de uso. Potencia máxima definida por el equipo.

La metodología para el modelizado de los equipos durante el periodo de instalación configuración del sistema, se presentará a continuación. La situación definida por el consorcio en que se indicaba la falta de información tecnológica sobre los equipos transformadores de energía en muchas instalaciones ha hecho definir unos modelos por defecto para asegurar la funcionalidad. Estos modelos serán utilizados siempre que el usuario no incorpore información específica de la tecnología.

C.3 Presentación de los modelos

A continuación se muestran los resultados de la metodología de modelización presentada aplicada a las tecnologías presentes en la planta piloto del proyecto. En estos momentos la planta piloto dispone de una muestra de todas las tecnologías modelizadas exceptuando la tecnología de cogeneración. Para la tecnología no presente en el proyecto se han utilizado información facilitada por los fabricantes.

C.3.1 Calderas de combustión

La caldera de combustión de gas natural modelizada es el modelo MCA115 DE Dietrich. A continuación se describe el equipo.

Tabla C.2: Característica Caldera de Gas Natural de condensación De Dietrich MCA 115.

Características		Modelo MCA115
Potencia Nominal máxima 50/30°C	kW	115
Rendimiento en % PCI		
100% Temp. media 70°	%	96,6
100% Temp. retorno 30°C	%	102,5
30% Temp. retorno 30°C	%	107,1
Potencia útil 50/30°C mín/máx	kW	18,4-114
Potencia útil 80/60°C mín/máx	kW	16,6-107



Figura C.5: Caldera de Gas Natural de condensación De Dietrich MCA 115.

A continuación se muestra el modelado teórico basado en la propuesta presentada para este equipo:

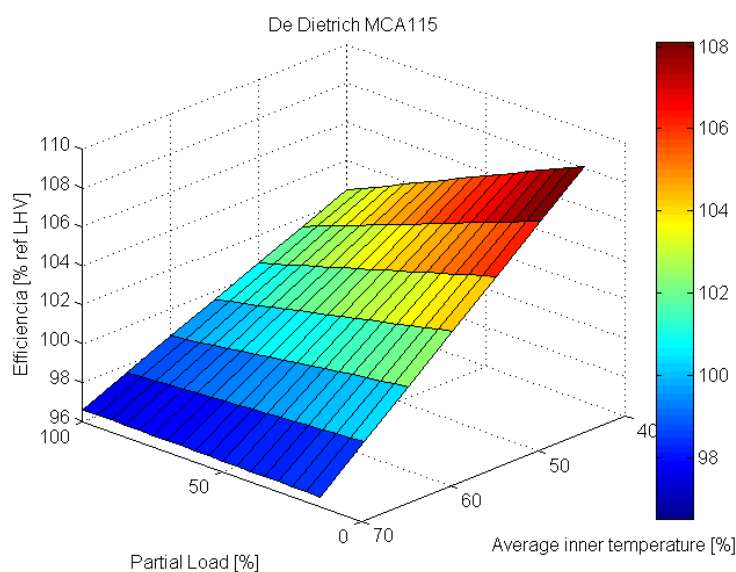


Figura C.6: Modelo teórico de caldera de gas natural de condensación desarrollado para el modelo de caldera De Dietrich MAC115.

C.3.2 Refrigeradora y bombas de calor

Para las tecnologías de refrigeradoras y bombas de calor basadas en ciclos de compresión de vapor, se ha aplicado la metodología desarrollada en el desarrollo de un modelo basado en datos de fabricante para la refrigeradora DAIKIN EWAD790CZXR-Stelpess presente en la planta piloto. A continuación se describe el equipo.



Figura C.7: Enfriadora Daikin EWAD790CZXR.

Tabla C.2: Características de la enfriadora aire-agua Daikin EWAD790CZXR.

Modelo				EWAD790CZXR -Stepless											
Marca				Daikin											
Tipo				Agua-Aire											
Potencia referencia				790*						kW					
COP referencia				2,91**											
COP & Capacidad vs Temperatura Exterior**															
LWT	25°C			30°C			35°C			40°C			45°C		
	Cap	Consumo.	COP	Cap	Consumo.	COP	Cap	Consumo.	COP	Cap	Consumo.	COP	Cap	Consumo.	COP
	kW	kW	-	kW	kW	-	kW	kW	-	kW	kW	-	kW	kW	-
5	270	80	3,375	256	88	2,909	241	95	2,536	255	104	2,163	207	113	1.831
6	279	81	3,444	265	89	2,977	249	96	2,593	232	105	2,209	214	114	1.877
7	287	82	3,50	273	90	3,03	256	98	2,61	239	106	2,25	221	116	1,91
8	295	83	3,554	280	91	3,076	264	99	2,666	246	107	2,299	227	117	1.940
10	313	86	3,639	297	93	3,193	279	101	2,763	260	110	2,363	241	120	2.008

*LWT: Temperatura de salida de agua 7°C.

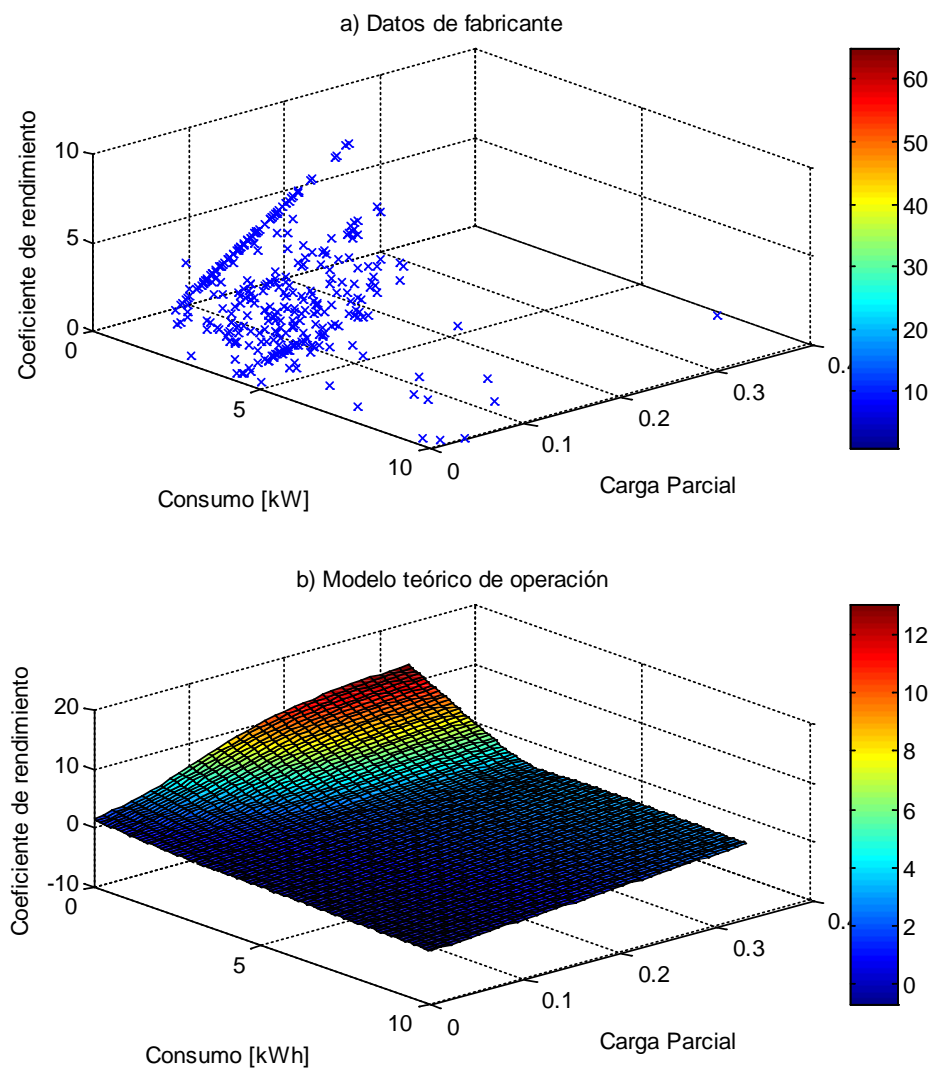


Figura C.8: Ejemplo de generación de modelo teórico de un equipo a través de las hojas técnicas y los datos de fabricante: a) Datos de fabricante, b) Modelo teórico generado.

C.3.3 Tecnología solar térmica

Para la modelización de la tecnología de captadores solares térmicos, tanto de tubos de vacío, como los paneles solares planos, se ha elegido el modelizado de los paneles VITOSOL 200T. A continuación se muestran los datos de este equipo:

Tabla C.4: Característica de los captadores solares de tubos de vacío VITOSOL 200T.

Superficie	M2	2
Número de tubos		20
Superficie bruta	m2	2,866
Superficie de absorción	m2	2,013
Superficie de apertura	m2	2,147
Distancia entre colectores	mm	102

Dimensiones		
Anchura a	mm	1420
Altura b	mm	2040
Profundidad c	mm	143
– Rendimiento óptico (área apertura)	%	71,9
– Coeficiente de pérdida de calor k1	W/(m ² K)	1,45
– Coeficiente de pérdida de calor k2	W/(m ² K ₂)	0,0051
– Rendimiento óptico (área absorción)	%	76,7
– Coeficiente de pérdida de calor k1	W/(m ² K)	1,54
– Coeficiente de pérdida de calor k2	W/(m ² K ₂)	0,0055



Figura C.9: Captador Solar de Tubos de Vacío VITOSOL 200T.

A continuación se representa un modelo de la tecnología.

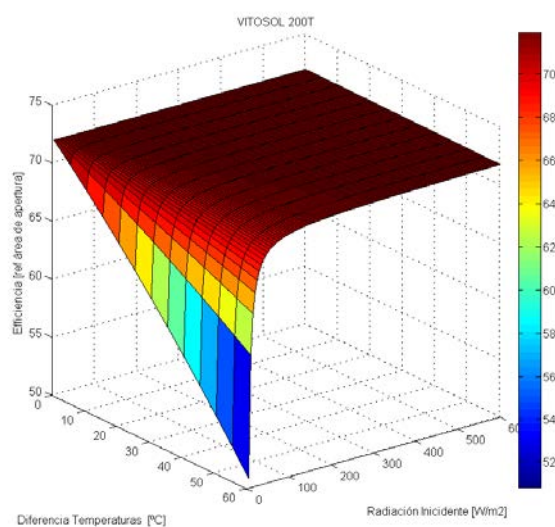


Figura C.10: Modelado basado en datos de fabricante para el captador VITOSOL 200T.

C.3.4 Cogeneración

La cogeneración no es una opción presente en la planta piloto seleccionada del proyecto. Por la modelización basada en datos de fabricante se ha seleccionado el modelo de cogeneración DACHS 5,5 como uno de los modelos más utilizados actualmente en los sistemas de climatización:

Tabla C.5: Características del sistema de cogeneración DACHS 5,5.

Combustible		Gas Natural
Potencia eléctrica	kW	5,5
Potencia térmica con	kW	14,8
Consumo de combustible	kW	20,5
Consumo eléctrico	kW	0,12
Temperatura de ida	°C	83
Temperatura de retorno	°C	70
Conexión eléctrica		3 ~ / 400 V / 50 Hz
Rendimiento eléctrico		27%
Rendimiento térmico con		72%

El modelado del sistema de cogeneración muestra la eficiencia térmica en función de la carga parcial. Se ha considerado la eficiencia eléctrica constante en todo momento.

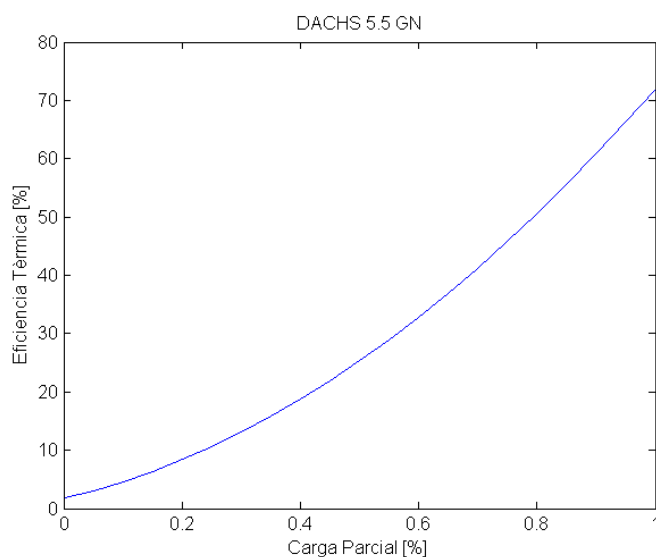


Figura C.11: Modelado basado en datos de fabricante para la eficiencia térmica del equipo DACHS 5,5.

ANEXO D: Resumen del análisis de modelados

A continuación se presenta un resumen de las características de las técnicas computacionales analizadas. La información contenida en este anexo ha sido extraída del apartado 6.4 del documento E4.1 - Modelos dinámicos para el sistema energético consumidor, a partir de datos históricos y “energy drivers” de GDO2Clim [17].

- *Artificial Neural Networks*
 - ✓ *Tiempos de entrenamiento aceptables.*
 - ✓ *Complejidad estructural de los modelos considerados.*
 - ✓ *Adaptabilidad frente a las componentes aleatorias en la señal modelada.*
 - ✓ *Sistema MIMO. Adaptable a diversos tamaños de base de datos con incrementos aceptables en los costes de computo.*
 - ✓ *Alta capacidad de cooperación con otros algoritmos computacionales (hibridación).*
 - ✓ *Adecuado para su aplicación en sistemas dinámicos.*
 - ✓ *Difícil configuración que dificulta su automatización.*
- *Fuzzy Logic*
 - ✓ *Amplio uso en el modelado básico de perfiles energéticos y diagnóstico de fallos.*
 - ✓ *Adaptabilidad ante problemas con incertidumbres y ambigüedades.*
 - ✓ *Adaptabilidad ante cualquier tamaño de base de datos.*
 - ✓ *Relativamente simple parametrización para sistemas estáticos.*
 - ✓ *Dificultad de adaptación en sistemas donde las dinámicas tienen un peso importante, como es el caso de los sistemas de climatización.*
- *Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems*
 - ✓ *Errores de predicción bajos.*
 - ✓ *Tiempos de entrenamiento aceptables.*
 - ✓ *Adaptabilidad alta frente a las componentes aleatorias en la señal modelada.*
 - ✓ *Adecuado para su aplicación en sistemas dinámicos.*
 - ✓ *Sistema MIMO. Adaptable a bases de datos reducidas con incrementos relativamente aceptables en los costes de computo.*
 - ✓ *Posibilidad de configuración previa que facilita su automatización.*

Habiendo realizado una revisión del estado del arte en cuanto a técnicas computacionales de modelado aplicadas a sistemas energéticos y habiendo analizado sus ventajas en inconvenientes, se concluye que la técnica que se ajusta mejor al caso de uso es ANFIS, porque presenta la adaptabilidad de las redes neurales frente a sistemas dinámicos mientras que facilita la parametrización y configuración, necesario para la automatización del sistema.

